

FAT-Schriftenreihe 329

Untersuchung zu den Einsatzmöglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Entwicklung von 3D-Rahmenstrukturen in Crashlastfällen



Untersuchung zu den Einsatzmöglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Entwicklung von 3D-Rahmenstrukturen in Crashlastfällen

**Forschungsstelle:
Bergische Universität Wuppertal
Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen**

#

**Autoren:
Prof. Dr.-Ing. Axel Schumacher
Florian Beyer (M.Sc)**

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsvereinigung
Automobiltechnik e.V. (FAT) gefördert.

Danksagung

Zuallererst und besonders bedanken wir uns bei Thorsten Pohl von der Opel Automobile GmbH, Leiter des Arbeitskreises *CAE in der Konzeptfindung*, für seine tatkräftige Unterstützung bei der Projektdurchführung.

Für die Betreuung des Projekts möchten wir der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) und hier insbesondere Frau Prof. Langowsky und Frau Strese für ihre engagierte Unterstützung herzlich bedanken.

Die interessanten Diskussionen und Anregungen aus Sitzungen des Arbeitskreises *CAE in der Konzeptfindung* haben erheblich zum Gelingen des Projekts beigetragen. Hierfür gilt unser Dank

- Dr. Axel Hänschke (ehem. Ford Werke GmbH, jetzt CPS-Consulting),
- Jens Menzen (Ford Werke GmbH),
- Tobias Duffe (Ford Werke GmbH),
- Dr. Stefan Schwarz (Porsche AG),
- Thorsten Pohl (Opel Automobile GmbH),
- Prof. Lothar Harzheim (Opel Automobile GmbH),
- Dr. Andreas Hillebrand (Volkswagen AG),
- Mathias Brass (Volkswagen Osnabrück),
- Bernd Scholz (ZF Group),
- Dr. Christian Buse (Benteler International AG) und
- Dr. Lars Fredriksson (Altair Engineering GmbH).

Dank gilt ebenfalls Herrn Johan Gunnarsson von der Altair Engineering GmbH und unseren Kolleg*innen vom Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen der Bergischen Universität Wuppertal Herrn Dominik Schneider und Frau Miriam Kick.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung des bearbeiteten Forschungsprojekts	2
1.3	Veröffentlichung	2
2	Einführung in die Grundlagen der Strukturoptimierung	3
2.1	Algorithmierte Strukturoptimierung	3
2.2	Arten der Strukturoptimierung	3
2.3	Optimierung crashbelasteter Strukturen	6
3	Stand der Technik zu Optimierungsverfahren von crashbelasteten Strukturen	8
4	Graphenbeschreibung zur Optimierung von Strukturen	11
4.1	Graphentheorie	11
4.2	Graphenbeschreibung der GHT2D	12
4.3	Graphenbeschreibung der GHT3D	15
4.3.1	Hierachische Graphenstruktur	15
4.3.2	Graphen-Element	17
4.3.3	Vertex-Element	17
4.3.4	Edge-Element	18
4.4	Orientierung und Richtung der Profile	20
4.5	Steuerung der Profillänge	21
4.6	Beispiele zum Aufbau des Finite-Elemente Modells	22
5	Heuristiken zur Optimierung crashbelasteter Rahmenstrukturen	26
5.1	Abstützen schnell deformierender Edges	27
5.2	Nutzen von Deformationsräumen Zug und Druck	28
5.3	Teilen langer Edges	29
5.4	Ausgleichen der Energiedichte und Löschen unbelasteter Edges	30
5.5	Skalieren der Wandstärken und Glätten des Graphen	31
6	Optimierungsablauf der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung	33
6.1	Finden von Optima in der heuristikbasierten Optimierung	35
6.2	Software Schnittstellen im Prozess	35

7	Erweiterte Graphenfunktionen	36
7.1	Geometrische Restriktionen auf der Graphenebene	36
7.2	Symmetrie des Graphen	37
7.3	Dimensionierungsvariablen	37
7.4	Formvariablen	38
8	Integration der Crushable Frame Springs von Altair	41
8.1	1D-Element zur Approximation des Verhaltens crashbelasteter Profile . . .	41
8.2	Die Graphen und Heuristikbasierte Topologieoptimierung mit Crushable Frame Springs	43
8.2.1	Aufbau des Prozesses innerhalb des Optimierungsablaufs	44
8.2.2	Charakterisierung der Crushable Frame Springs über Metamodelle .	45
8.2.3	Variation der Verbindungsknoten in den Modellen	45
9	Anwendungsbeispiele: Crashbelasteter Rahmen	47
9.1	Rahmenstruktur: Einschlag starrer Zylinder	48
9.1.1	Optimierungsziel: Minimiere die Intrusion des Zylinders	49
9.1.2	Optimierungsziel: Minimiere die Intrusion des Zylinders mit Crus- hable Frame Springs	52
9.1.3	Optimierungsziel: Minimiere die maximale Kontaktkraft des Zylinders	55
9.2	Rahmenstruktur: Einschlag starre Wand	57
9.2.1	Optimierungsziel: Minimiere die Intrusion der Wand	58
9.2.2	Optimierungsziel: Minimiere die maximale Kontaktkraft der Wand .	61
10	Zusammenfassung und Ausblick	65
11	Abbildungsverzeichnis	67

1 Einleitung

Optimierungsverfahren sind Methoden, die in der Konzeptphase und im Entwicklungsprozess im Automobilbau wichtige Unterstützung leisten können. Dazu zählt beispielsweise eine Reduzierung der Entwicklungszeit durch einen automatisierten Prozess, in dem eine Vielzahl von Anforderungen berücksichtigt werden können, ohne manuelle „trial and error“ Ansätze verfolgen zu müssen. Ein wichtiges Ziel stellt die Gewichtsreduzierung der tragenden bzw. crashrelevanten Strukturen dar. In diesem Bericht wird die Erweiterung der Graphen und Heuristikbasierten Topologieoptimierung für dreidimensionale Rahmenstrukturen für Crashlastfälle vorgestellt. Die Forschungen basieren auf der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung (GHT-2D) [9] zur Optimierung von Profilquerschnitten. Die topologische Änderung des Querschnitts wird in diesem Verfahren von verschiedenen Heuristiken ausgeführt. Jede Heuristik generiert einen neuen Entwurf, indem mechanisch sinnvolle Strukturwände in das Profil eingezogen werden.

Die Neuentwicklung beinhaltet die Beschreibung von Rahmenstrukturen durch einen dreidimensionalen Graphen. Die Rahmenstruktur besteht aus mehreren zusammengesetzten Profilen mit starren Verbindungsknoten, die in einem Crashlastfall belastet wird. Im Kern geht es bei Optimierungsprozeduren um einen automatisierten Ablauf. Idealerweise sollen mit dieser Prozedur automatisiert und iterativ Verbesserungen für verschiedene Problemstellungen erzielt werden. Während dem Ablauf finden topologische Modifikationen, Form- und Dimensionierungsoptimierungen statt. Die Besonderheit des Verfahrens liegt in der Ausführung von Heuristiken, die basierend auf Simulationsdaten topologische Graphenmodifikationen an den dreidimensionalen Strukturen vorschlagen.

1.1 Problemstellung

Die heute vielfach eingesetzten Verfahren zur Topologieoptimierung sind für Bauteile mit linear-elastischen Strukturverhalten konzipiert. In diesem Fall sind die Verfahren wegen der Bereitstellung der (semi-)analytischen Sensitivitäten der Ziel- und Restriktionsfunktionen nach den Entwurfsvariablen effizient einsetzbar [16]. Es können also allenfalls moderat nicht-lineare Eigenschaften des Bauteils in der Optimierung berücksichtigt werden. Crashrelevante Ziel- und Restriktionsfunktionen können hierbei nicht berücksichtigt werden. Deshalb gibt es spezielle Optimierungsverfahren für die Topologieoptimierung von Crashstrukturen.

Die GHT-2D Methode kann erfolgreich crashbelastete Querschnitte von Extrusionsprofilen optimieren. Im Wesentlichen ist das Verfahren in zwei Ebenen unterteilt. Zur geometrischen Beschreibung der zu optimierenden Strukturen wird ein zweidimensionaler mathematischer Graph verwendet. Aus der Graphenbeschreibung wird ein rechenfähiges Finite Elemente Modell abgeleitet. Die Besonderheit dieser Trennung beinhaltet, dass Geometrieveränderungen auf der Graphenebene durchgeführt werden können und das Finite Elemente Modell daraus resultiert und dadurch eine enorme Flexibilität bietet. Diese Abfolge lässt die interne Berücksichtigung von geometrischen Restriktionen auf der Graphenebene zu. Das Finite Elemente Modell des Profils entsteht dann durch Extrusion in Richtung der dritten Dimension. Als Ergebnis können Profile mit gleichbleibenden Querschnitt optimiert werden. Die Strukturermittlung von dreidimensionalen Rahmenstrukturen ist mit der bisherigen Methode nicht möglich und beschränkt sich auf Komponente, wie beispielsweise den Schweller am Fahrzeug.

1.2 Zielsetzung des bearbeiteten Forschungsprojekts

Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer Methode zur Layout-Findung von dreidimensionalen Rahmenstrukturen unter der Berücksichtigung von Crashlastfällen. Die an der Universität Wuppertal entwickelte Methode der GHT-2D dient dabei als Grundlage. Es sollen vorhandene Methoden verwendet und erweitert werden.

Zur Optimierung von dreidimensionalen Strukturen soll eine neue Syntax entwickelt werden. Änderungen der Geometrie werden dann auf Basis der erzeugten Simulationsdaten durch Heuristiken vorgeschlagen. Neben der Geometriemanipulation können Herstellungsrestriktionen auf der Graphenebene innerhalb des Optimierungsablaufs berücksichtigt werden. Für die Anwendung im dreidimensionalen Raum wird das vorhandene Wissen aus den bestehenden Heuristiken einfließen. Mit der flexiblen Syntax sollen beispielsweise Teile von Rahmenstrukturen abgebildet werden können mit der Zielsetzung, Strukturen in Crashlastfällen zu optimieren. Zusätzlich soll die Verwendung von schnell rechnenden Elementen anstelle von Vollschalenmodellen ermöglicht werden. Die Leistungsfähigkeit des Optimierungsprozesses wird an gut verständlichen Beispielen demonstriert. Der Fokus liegt dabei auf der Berücksichtigung von Crashlastfällen.

1.3 Veröffentlichung

Die im Rahmen des Projekts erhaltenen Ergebnisse wurden eingereicht (vorläufig):

- Beyer, F. und Schneider, D. und Schumacher, A. "Finding three dimensional layouts for crashworthiness load cases using the Graph and Heuristic Based Topology optimization". Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization (2020)

2 Einführung in die Grundlagen der Strukturoptimierung

In diesem Kapitel werden grundlegende Begriffe und Arten der Strukturoptimierung erklärt. Dabei werden die einzelnen Verfahren näher erläutert, welche in diesem Projekt Anwendung finden. Die Erläuterung soll eine gemeinsame Basis für wichtige Begrifflichkeiten schaffen.

2.1 Algorithmierte Strukturoptimierung

Die Strukturoptimierung ist als Entwicklungswerkzeug zu verstehen [16]. Überall dort, wo Verbesserungspotenzial besteht, kann die Optimierung eingesetzt werden. Für Strukturoptimierungen braucht man ein Modell des mechanischen Verhaltens. Dieses Modell, in der Regel ein Finite Elemente Modell, ist zentraler Bestandteil der Optimierungsrechnung. Allgemein gesprochen ist es das Ziel der Strukturoptimierung, die Bauteileigenschaften hinsichtlich der gegebenen Anforderungen zu verbessern. Kern einer Optimierungsprozedur stellt die Kopplung des Analysemodells mit einem Optimierungsalgorithmus dar, welcher die Entwurfsvariablen so verändert, dass die Bauteilstruktur verbessert wird. In Abb. 2.1 ist ein einfacher Optimierungsprozess skizziert. Mit den Werten der Entwurfsvariablen aus dem Startentwurf wird die Aufgabe analysiert und ausgewertet. Der Optimierungs-

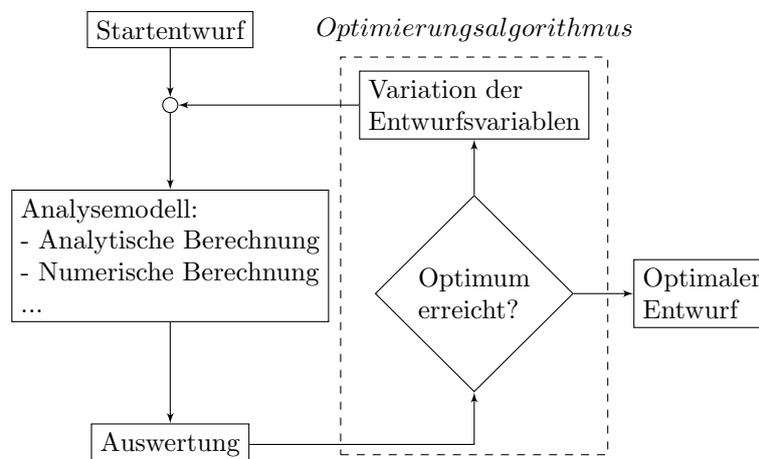


Abbildung 2.1: Optimierungsschleife, bestehend aus einem Analysemodell und dem Optimierungsalgorithmus [16]

algorithmus verändert freigegebene Entwurfvariablen nach einer eindeutigen Handlungsvorschrift. Die Veränderung und anschließende wiederkehrende Berechnung des Modells wird so lange ausgeführt, bis ein Abbruchkriterium oder eine definierte Höchstanzahl von Iterationen erreicht wurde. Jede Berechnung stellt einen Funktionsaufruf dar. Dadurch entsteht eine Vielzahl von Entwürfen, wovon jeder einzelne Entwurf einen Teil des Entwurfsraums darstellt. Die Grenzen des Entwurfsraums werden Restriktionen genannt. Diese Nebenbedingungen können aus fertigungstechnischer Sicht den Entwurfsraum sinnvoll einschränken. Außerdem kann es weitere Restriktionen zu dem mechanischen Verhalten der Struktur geben.

2.2 Arten der Strukturoptimierung

Die Problemstellungen der Strukturmechanik können mit verschiedenen Ansätzen der Optimierung behandelt werden.

- **Wahl der Bauweise:** Dabei handelt es sich um den grundlegenden Aufbau oder das Konzept, nach dem eine Struktur umgesetzt werden soll. Dazu sind beispielsweise Verbundstrukturen oder Blechstrukturen zu nennen.
- **Material:** Die Auswahl von Materialien stellt ebenso eine grundlegende Problemstellung dar, denn unterschiedliche Materialien führen zu unterschiedlichen Konstruktionslösungen.
- **Topologie:** Beschreibt die Anordnung von Material im Entwurfsraum, in dem auch die Entstehung von Durchbrüchen oder Löchern erlaubt sind.
- **Form:** Die Beschreibung der Entwurfsvariablen beschränkt sich dabei auf die Gestalt, wobei die Topologiekategorie erhalten bleibt.
- **Dimensionierung:** Beinhaltet Variablen zur Beschreibung von beispielsweise Wandstärken im Querschnitt.

Die beschriebenen Arten zur Optimierung müssen nicht streng getrennt voneinander ausgeführt werden, sondern können auch in Kombination auftreten. Ein Auszug von Begrifflichkeiten zum Thema Optimierung findet sich in Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Erläuterung wichtiger Begriffe, die in der Optimierung verwendet werden, alphabetisch sortiert, modifiziert aus [16]

Begriff	Definition
Analysemodell	Mathematische Beschreibung der Modelleigenschaften
Bauraum	Der Bereich einer Struktur, in der sich das Bauteil ausbilden darf
Design-Bereich/ Design-Space	Bereiche, die durch den Einfluss der Entwurfsvariablen beeinflusst werden; zusammen mit dem Non-Design-Bereich bilden sie den Bauraum
Entwurfsraum	Bereich, in dem die Variablen angepasst werden soll
Entwurfsvariablen	Die zu variierenden Konstruktionsgrößen und Einflussgrößen
Heuristik	Regelbasierter Ablauf zum Finden von strukturellen Verbesserungen für ein Problem
Optimierungsalgorithmus	Mathematisches Verfahren zur Minimierung einer Zielfunktion, wobei Restriktionen berücksichtigt werden können
Optimierungsproblem	Zusammenfassung der Zielfunktion, Restriktionen und Entwurfsvariablen in einer geschlossenen Problemstellung
Optimierungsprozedur/ -prozess	Software zur Behandlung einer Optimierungsaufgabe
Optimierungsstrategie	Vorgehensweise zur Reduktion komplexer Optimierungsaufgaben auf beispielsweise einfache Ersatzprobleme
Optimierungsverfahren/ -methode	Zusammenstellung der Optimierungsansätze und Optimierungsalgorithmen zur Lösung von Optimierungsaufgaben
Restriktionen	Mathematisch formulierte Forderungen von Randbedingungen, die einzuhalten sind
Startentwurf	Startwerte der Entwurfsvariablen
Strukturantwort	Antwort des Analyse- bzw. Simulationsmodells
Zielfunktion	Mathematische Formulierung eines oder mehrerer Ziele bzw. Auslegungsziele
Zielfunktionswert	Größe der Zielfunktion

2.3 Optimierung crashbelasteter Strukturen

Im vorangegangenen Kapitel wurde die Eingliederung eines Finite Elemente Modells im Optimierungsprozess erwähnt. Die Berechnung der Finite Elemente Modelle stellen den aufwendigsten Schritt innerhalb der Optimierungsschleife dar.

Crashbelastete Strukturen bestehen zum überwiegenden Teil aus Blechstrukturen, die in der Schalenbauweise zusammengesetzt sind. Die gesamte Fahrzeugkarosserie erhält dann erst durch unterschiedliche Fügeverfahren ihre Struktursteifigkeit. Eine weitere bekannte Bauart für Fahrzeuggestelle ist die *Space-Frame*-Variante. Die Karosserie wird in diesem Ansatz aus Hohlprofilen und Verbindungsknoten zusammengesetzt.

Speziell zur Auslegung von Strukturen für vorgegebene Crashlastfälle werden Simulationen aufgebaut, die das Fahrzeug vom strukturmechanischen Verhalten her abbilden. Zur Auslegung der crashbelasteten Strukturen kommen nicht-lineare Finite Elemente Solver zum Einsatz, die eine Lösung explizit ermitteln. In diesem Entwicklungsprozess werden dünnwandige Strukturen mit Finiten Schalenelementen diskretisiert. Zumeist werden Schalenelemente durch vier Eckknoten definiert und haben fünf Integrationspunkten über ihre Dicke. Für weitergehende Literatur zur Theorie von Schalenelementen sei an dieser Stelle auf [3] verwiesen.

Die Herausforderungen bei der Optimierung crashbelasteter Strukturen mit der nicht-linearen Finite Elemente Berechnung basieren auf verschiedenen Phänomenen:

- **Nicht-lineare Materialverhalten** Die komplexen Materialmodelle, die einer Crashsimulation zugrunde liegen, erhalten nicht-lineare Spannungs-Dehnungsverläufe. Diese Verläufe können auch dehnratenabhängig sein.
- **Geometrische Nicht-Linearität** Dazu zählen große Verformungen und Stabilitätseffekte, wie Kippen, Beulen und Knicken.
- **Kontakt zwischen Komponenten** Bei der Simulation von Kontakt können zeitabhängig verschiedene Bauteilfronten aufeinander treffen und Gegenkräfte induzieren.
- **Simuliertes Versagen** Versagen von Bauteilen kann in einer einfachen Form durch Löschen von einzelnen Finiten Elementen erfolgen.
- **Diskretisierung in der Zeit** Explizite Finite Elemente Solver berechnen das mechanische Verhalten, approximiert über die Zeit.

In der Optimierung müssen folgende Eigenschaften von Crashstrukturen berücksichtigt werden können:

- Spezielle Beschleunigungswerte, z.B. der OLC-Wert (Occupant Load Criterion) oder der HIC-Wert (Head Injury Criterion),
- Energieabsorption,
- Spezielle Kraftniveaus,

- Glatte Kraft-Weg-Kurven,
- Spezielle Lastpfade für spezielle Lastfälle,
- Hohe Steifigkeiten in speziellen Bereichen, z.B. bei Komponenten im Kraftfluss im Fahrgastbereich
- Geringe Steifigkeiten in speziellen Bereichen, z.B. an den möglichen Kopfaufprallpositionen,
- Spezielle Sicherheitskriterien, wie z.B. die Dichtigkeit des Kraftstoffsystems

Die Optimierung wird durch die folgenden Eigenschaften von Crashstrukturen und deren Simulationen erschwert:

- keine glatt über die Zeit verlaufenden Struktureigenschaften
- wenig verlässliche Materialdaten
- Streuung der Materialdaten
- netzabhängige Ergebnisse
- physikalische Verzweigungspunkte
- numerische Verzweigungspunkte

3 Stand der Technik zu Optimierungsverfahren von crashbelasteten Strukturen

In der Entwicklung von Kraftfahrzeugen ist ein Teil der Anforderungen der Crashesicherheit gewidmet. Bei einem Unfall sollte die Fahrgastzelle der Insassen möglichst erhalten bleiben. Die Beschleunigungsspitzen, die bei den Insassen bei einem Aufprall entstehen können, müssen dagegen möglichst gering gehalten werden, um vor tödlichen Verletzungen zu schützen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit von steifen Strukturen einerseits und energieabsorbierenden Strukturen andererseits. Im vorderen und hinteren Bereich des Fahrzeugs liegen solche Deformationszonen zur Energieabsorption, um möglichst viel kinetische Energie gleichmäßig in Deformationsenergie umzuwandeln. Der größte Teil der kinetischen Energie wird durch die plastische Verformung von Metallstrukturen absorbiert. Diese physikalischen Größen müssen in der Simulation auswertbar sein und im Optimierungsprozess berücksichtigt werden können. Die Masse des Fahrzeugs soll stetig verringert werden, um die Reichweite und Effizienz zu erhöhen und gleichzeitig mehr Gewichtskapazität für Zuladung zu erhalten. Diese teils konkurrierenden Anforderungen sind voneinander abhängig. Darüber hinaus gibt es weitere Anforderungen, wie beispielsweise der bekannten NVH-Verhalten (Noise, Vibration, Harshness).

Numerische Simulationen, zusammen mit iterativen Optimierungsverfahren, finden seit Jahren im Entwicklungsprozess Anwendung und helfen dabei die genannten Anforderungen zu erfüllen. Für die Layoutfindung in linear statischen Anwendungen werden häufig Topologieoptimierungsmethoden mit dem Homogenisierungsansatz [2] eingesetzt. Dieses Verfahren kann eine große Menge an Entwurfsvariablen verarbeiten, bei denen die Auswertung von Gradienteninformationen direkt mit Daten aus der Simulation erfolgt. Unter den Bedingungen, die in Kapitel 2.3 genannt werden, können Lösungsansätze wie der Homogenisierungsansatz für crashbelastete Strukturen nicht eingesetzt werden. Die dynamischen Simulationen mit einer Diskretisierung über die Zeit, Kontaktproblemen, nichtlinearen Verformungen und Materialeigenschaften verhindern die Verwendung von gradientenbasierten Optimierungsalgorithmen, da die Sensitivitäten bezüglich einer Zielfunktion nicht für jede Entwurfsvariable analytisch abgeleitet werden können.

Derzeitige Forschungsaktivitäten konzentrieren sich auf alternative Optimierungsmethoden. Im Ansatz in [17, 18] wird versucht, die Sensitivitäten für beispielsweise ein Verschie-

bungsfeld über eine adjungierte Methode zu ermitteln. Dabei werden die Sensitivitäten pro Element aus einer adjungierten Gleichgewichtsbedingung approximiert ermittelt. Diese Sensitivitäten werden hier als topologische Ableitungen bezeichnet, da diese auf eine variable Fehlstelle oder ein variables Loch für einen Punkt im Raum bezogen sind.

Ivarsson [7] verwendet die adjungierte Methode zur Ermittlung der Sensitivitäten unter Einbeziehung eines linear isotropen Materialmodells mit begrenzter Dehnung. Bei diesem Ansatz sind die Sensitivitäten auf die Materialeigenschaften bezogen.

Andere Forschungsaktivitäten zur Topologieoptimierung von Crash-Strukturen verwenden vereinfachte Ziel- und Restriktions-Funktionen.

Pedersen [15, 14] schlägt einen *Ground Structure Approach* für transiente Berechnungen von Rahmenstrukturen vor. In diesem Verfahren wird eine Balken-Gitterstruktur verwendet, um crashbelastete Strukturen zu optimieren. Jeder der eindimensionalen Balken besitzt einen quadratischen Querschnitt und das Verfahren erlaubt große Verschiebungen und große Rotationen. Außerdem besitzen die Balken eine Formulierung für Plastifizierung.

Im Folgenden werden einige Topologieoptimierungsmethoden genannt, die gar ohne mathematische Gradienten auskommen und an hochgradig nicht-lineare Probleme adressiert sind.

Das Verfahren der Hybrid Cellular Automaton (HCA) [12, 13] ist ein heuristisches Verfahren zur Topologieoptimierung von crashbelasteten Strukturen. Das Ziel ist die Homogenisierung der internen Energiedichteverteilung innerhalb der Struktur. Der gesamte Bauraum ist mit Volumenelementen diskretisiert. Für jedes Element wird eine eigene Zelle definiert, der eine künstlichen Dichte zugewiesen wird, analog zum Homogenisierungsansatz. Darüber hinaus können mehrere Elemente einer Zelle angehören. Die künstliche Dichte wird nach der Auswertung einer Crashberechnung iterativ geändert, wobei auch Informationen von Nachbarelementen berücksichtigt werden. Ein Derivat der HCA-Methode ist in der kommerziellen Software LS-TASC implementiert.

Hybrid Cellular Automata für dünnwandige Strukturen (Hybrid Cellular Automata for Thin Walled Structures - HCATWS) [6] [19] ist eine Abwandlung der HCA. Als Bauraum kommt eine Gitterstruktur aus Schalenelementen zum Einsatz, deren innere Energiedichte zwischen den Schalenwänden homogenisiert wird.

Die ESL-Methode (Equivalent Static Loads Method - ESL) [4] [11] verwendet als Ansatz, ein nicht-lineares Problem in ein linear statisches Problem zu überführen. Dies erlaubt den Einsatz von gradientenbasierten Optimierungsverfahren auf der linear statischen Ebene zur Topologieoptimierung. In einem ersten Schritt wird eine nicht-lineare Finite Elemente Analyse ausgeführt, damit die Verschiebungsfelder für einen vorgegebenen Zeitpunkt extrahiert werden können. In einem zweiten Schritt wird dieses Feld als initiale Verschiebung auf der linear statischen Ebene aufgebracht. Die äquivalenten statischen Lasten können für verschiedene Zeitschritte erzeugt und als mehrere Lastfälle in der Topologieoptimierung berücksichtigt werden. Das Optimum aus der linear statischen Ebene wird als Startentwurf für die nächste Iteration verwendet, um neue Verschiebungen zu erzeugen.

Die ESL-Methode ist in der kommerziellen Software Altair OptiStruct mit RADIOSS, als auch in GENESIS mit LS-DYNA umgesetzt.

Die Graphen und Heuristikbasierte Topologieoptimierung (GHT) [9] wurde für die Optimierung von crash belasteten Profilquerschnitten mit gleichbleibenden Querschnitt entwickelt. Bei einem dreidimensionalen Profil wird der Querschnitt mit einem zweidimensionalen mathematischen Graphen beschrieben und an einer Kurve extrudiert. Die Geometrie des Querschnitts wird über den Graphen modifiziert, um das mechanische Verhalten bezüglich der Crashlastfälle zu verbessern. Das Verfahren kann hochgradig nicht lineare Simulationen berücksichtigen und ist in zwei ineinander geschachtelten Optimierungsschleifen getrennt. In der äußeren Optimierungsschleife wird die Topologie des Querschnitts geändert und in der inneren Optimierungsschleife können einzelne Funktionsaufrufe, Form- und Dimensionierungsoptimierungen der Wandstärken ausgeführt werden. Die Topologieänderung wird von Heuristiken eingeleitet, die regelbasierten Abläufen entsprechen und für Crashlastfälle entwickelt wurden.

Bis hier hin können zweidimensionale Graphenbeschreibungen verwendet werden. Das Projekt setzt den Fokus auf die Erweiterung der Graphenbeschreibung um eine dritte Dimension und damit die Erweiterung auf ganze Rahmenstrukturen, bestehend aus mehreren Profilen.

Im Folgenden wird die Graphenbeschreibung der GHT-2D erläutert und im Anschluss die neue Syntax der Graphen und Heuristikbasierten Optimierung für 3D-Rahmenstrukturen beschrieben. Die neue Graphenbeschreibung nutzt zweidimensionale Graphen zur Charakterisierung für die Querschnitte der einzelnen Profile. Ein dreidimensionaler Graph gibt den Aufbau der gesamten Rahmenstruktur wieder. Beide Graphen basieren auf der gleichen Syntax. Das Finite Elemente Modell des Rahmens wird mit Schalenelementen abgebildet, wobei die zusammengesetzten Profile derzeit mit starren Verbindungsknoten verbunden sind. Aufbauend auf dem bereits existierenden Wissen aus der GHT2D [9] sind die Heuristiken für den neuen Anwendungsfall adaptiert. Der Optimierungsprozess ist nicht gebunden an bestimmte Ziel- oder Restriktionsfunktionen.

4 Graphenbeschreibung zur Optimierung von Strukturen

In diesem Kapitel werden relevante Grundlagen zu der in diesem Projekt verwendeten Grundstruktur der Graphentheorie erläutert. Zunächst werden allgemeine Grundlagen von Eigenschaften vorgestellt, die ein Graph beinhaltet. Am Schluss dieses Kapitels wird die für die dreidimensionale Graphensyntax verwendete Variante im Detail erklärt. Einen tieferen Einstieg in die Theorie der Graphen bietet [5].

4.1 Graphentheorie

Die Graphentheorie ist ein Teilgebiet der Mathematik, das verschiedene Beziehungen und Eigenschaften von Graphen untersucht. Ein Graph besteht aus einer Menge von Knoten und Kanten. Eine Kante verbindet jeweils zwei Knoten miteinander und stellt eine Beziehung zwischen ihnen her. Mit der Graphenbeschreibung können Problemstellungen in abstrahierter Form abgebildet werden, wie beispielsweise aus dem Straßenverkehr. Orte und Straßen werden den einzelnen Elementen des Graphen zugeordnet. In diesem Zusammenhang stellt sich beispielsweise die alltägliche Frage nach der kürzesten Route. Die Lösung des Problems wird dabei auf der Graphenebene algorithmenbasiert generiert, indem die kürzesten Pfade als Verbindungen zwischen je zwei Knoten ermittelt werden. Jeder Graph lässt sich in unendlich vielen Darstellungsformen in einer zwei-dimensionalen Ebene abbilden. Eine einfache Form findet sich in Abbildung 4.1 wieder. Die Knoten werden durch Kreise mit einer individuellen Nummerierung skizziert und die Beziehungen werden durch Linien symbolisiert. Die unterschiedlichen Darstellungsformen kommen durch die nicht definierte Positionierung der verschiedenen Knoten zustande. Die Graphen werden durch die Menge der Knoten $V = \{1, 2, 3, 4\}$ und Menge der Kanten $E = \{(1, 2); (2, 3); (3, 4); (4, 1)\}$

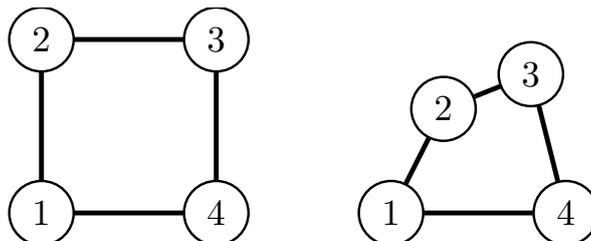


Abbildung 4.1: Zweidimensionale Graphendarstellung

definiert. Zwischen zwei verschiedenen Knoten können auch mehrere Kanten existieren. Diese werden dann als Mehrfachkanten oder Multikanten bezeichnet. Ein Graph gilt als einfach oder schlicht, wenn der Graph keine Mehrfachkanten oder Schleifen, also Kanten, die als Knotenpaar zwei identische Punkte definiert haben, aufweist. Wenn die Reihenfolge der Knoten innerhalb der Knotenpaare, welche die Kanten bestimmen beliebig ist, dann handelt es sich um einen ungerichteten Graphen. Sollte es sich um einen gerichteten Graphen handeln, dann wird die Orientierung der Kanten durch eine feste Reihenfolge der Knoten beschrieben. In der skizzierten Darstellung kann die Orientierung durch einen Pfeil am Ende der Kante erfolgen. Wenn ein Graph in einer Ebene ohne Überschneidung der Kanten darstellbar ist, wird dieser als planar oder plättbar bezeichnet. In Abbildung 4.2 ist ein Graph für drei Dimensionen dargestellt. Für die Anordnung gilt entsprechend für die Menge der Knoten $V = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$ und der Menge der Kanten $E = \{(1, 2); (2, 3); (3, 4); (4, 1); \dots; (5, 6); (6, 7); (7, 8)\}$.

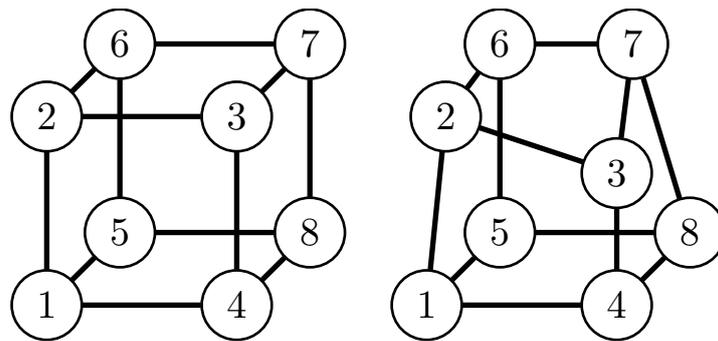


Abbildung 4.2: Dreidimensionale Graphendarstellung

In dem Verfahren der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung wird die Struktur durch einen mathematischen Graphen abstrahiert. Auf der Graphenebene können über verschiedenen Algorithmen beispielsweise geometrische Restriktionen berücksichtigt werden. Weiterhin können komplexe topologische Änderungen auf der Graphenebene durch das Verbinden von Knoten und Kanten umgesetzt werden. Auch Informationen über Eigenschaften können den einzelnen Elementen zugeordnet werden. Die Struktur wird direkt aus dem Graphen abgeleitet, wozu einige Informationen nötig sind, die im nachfolgenden Kapitel erläutert werden.

4.2 Graphenbeschreibung der GHT2D

In der zweidimensionalen Graphenbeschreibung [9] für Extrusionsprofile werden verschiedene Elemente verwendet. Darin sind die nötigen Informationen abgespeichert, die zum Aufbau eines Finite Elemente Modells benötigt werden. Nicht nur Informationen, wie beispielsweise die Wandstärke von Schalenelementen, sondern auch geometrische Informationen über den strukturellen Aufbau der Modelle und über den Ort von Knoten und

Strecken sind enthalten. Aus der zuvor beschriebenen Graphentheorie lässt sich der Aufbau in schlichte und planare Graphen einordnen. In diesem Verfahren beschreibt ein zweidimensionaler Graph den geometrischen Querschnitt eines Extrusionsprofils.

Zunächst lassen sich die Elemente dieser Graphensyntax in zwei Kategorien unterteilen. Strukturelle Knoten beschreiben den geometrischen Aufbau und logische Knoten speichern zusätzliche Informationen. Durch die Kombination dieser Elemente lässt sich ein Finite Elemente Modell abstrahiert durch den Graphen darstellen, wobei in dem Ablauf einer Optimierung das Rechenmodell aus dem Graphen resultiert. Die Eckpunkte oder auch Verbindungsknoten werden als LINK-Knoten bezeichnet. Die Beschreibung der LINK-Knoten ist in Tabelle 4.1 dargestellt. Der LINK-Knoten enthält eine Identifikations-

Tabelle 4.1: LINK-Knoten - Struktureller Knoten

Parameter	Datentyp	Erklärung
$\langle id \rangle$	Integer	Identifikationsnummer des Knoten
$\langle x \rangle$	Double	x -Koordinate des Verbindungspunktes
$\langle y \rangle$	Double	y -Koordinate des Verbindungspunktes

nummer und die zweidimensionalen Koordinaten der Position innerhalb des Querschnitts.

Eine Strecke oder auch Kante (*Edge*) verläuft zwischen zwei Knoten. Somit wird die Position einer *Edge* durch zwei Knoten definiert, die sich je am Anfang und am Ende befinden. Die Beziehungen zwischen *Edges* und *Vertices* sind innerhalb der ASCII basierten Graphenbeschreibung festgelegt. In Tabelle 4.2 sind weitere Struktur-Knoten dargestellt, die entlang einer *Edge* verlaufen. Die Reihenfolge der BEAM-Knoten ist vorgegeben, welche auch zugleich die Orientierung und Richtung der *Edge* angibt. Als erster Knoten wird der BEAM1-Knoten definiert, als zweiter der BEAMG-Knoten und den Schluss bildet der BEAM2-Knoten. Somit ergibt sich die Orientierung aus dem Aufbau der BEAM-Knoten von 1 in Richtung 2. Neben der Wandstärke sind Informationen, wie Krümmung oder Art des Knotens enthalten.

Zu den einzelnen Knoten existieren Regeln für eine strukturierte Anordnung des Graphen, dabei können Verbindungen von einzelnen *Edges* nur an LINK-Knoten realisiert werden. Das bedeutet, dass keine Verbindungen zwischen beispielsweise zwei BEAMG-Knoten zulässig sind. Der letzte logische Knoten ist der PARAM-Knoten und beinhaltet Information, wie die Länge des Bauteils, die Dichte und eine Bezeichnung. Der PARAM-Knoten ist in Tabelle 4.3 dargestellt. Die Identifikationsnummern jedes Typs sind einzigartig.

Eine beispielhafte abgeleitete Strukturwand besteht aus 4 *Edges*, 5 Strukturknoten und einem logischen Knoten. Die in der Auflistung 4.1 gezeigte Graphenbeschreibung im ASCII-Format stellt einen schematischen Ausschnitt der Graphensyntax dar. Aus der Graphensyntax kann der Querschnitt des Profils auf der Graphenebene abgebildet werden. Durch

eine Modellierung des Querschnitts und einer anschließenden Extrusion, kann ein vollständig rechenfähiges Finite Elemente Modell eines Profils erstellt werden. Dieses Format wird als Schnittstelle zwischen der Eingabe von geometrischen Daten und dem Optimierungsprozess verwendet. Auch die Manipulation durch den Optimierungsprozess selbst wird über die Graphensyntax ausgeführt. Durch die Verwendung der Graphenebene kön-

Auflistung 4.1: Ausschnitt aus 2D-Graphenbeschreibung

```

1 VERTEX , STRUCT , LINK , 1 , 0.0 , 10.0
2 VERTEX , STRUCT , LINK , 2 , 20.0 , 10.0
3 VERTEX , STRUCT , BEAMG , 3 , 0.5 , 0.5 , 0.0
4 VERTEX , STRUCT , BEAM1 , 4
5 VERTEX , STRUCT , BEAM2 , 5
6 VERTEX , LOGIC , PARAM , 6 , DENSITY , 2.7E-09 , LENGTH , 300.0 , NAME , mesh
7 EDGE , 1 , 4
8 EDGE , 4 , 3
9 EDGE , 3 , 5
10 EDGE , 5 , 2

```

nen geometrische Restriktionen berücksichtigt werden. Bei jeder Änderung des Graphen und der Berechnung der Ergebnisse entsteht ein neues Finite Elemente Netz und verhindert so verzernte Elemente und Modelle schlechter Qualität. Das zu optimierende Modell muss durch die Syntax abgebildet werden und kann im Prozess zusammen mit einem Lastfall oder anderen Bauteilen zusammengefügt werden. Ein Beispiel des Graphen und dem daraus resultierenden Finite Elemente Modells sind in Abbildung 4.3 dargestellt.

Tabelle 4.2: BEAM-Knoten - Strukturelle Knoten

BEAM	Parameter	Datentyp	Erklärung
BEAM1	VERTEX<id> Parameter<a>	Integer	Identifikationsnummer des Knotens, zusätzlicher Übergabeparameter
BEAMG	VERTEX<id> <to> <tu> <c>	Integer Double Double Double	Identifikationsnummer obere Wandstärke untere Wandstärke normierte Krümmung der Wand
BEAM2	VERTEX<id> Parameter<a>	Integer	Identifikationsnummer des Knotens zusätzliche Parameter

Tabelle 4.3: PARAM-Knoten - Logischer Knoten

Parameter	Datentyp	Erklärung
PARAM<id>	Integer	Identifikationsnummer des Knoten
NAME<n>	String	Bezeichnung der Struktur
LENGTH<l>	Double	Extrusionslänge der Struktur
DENSITY<p>	Double	Dichte des Materials der Struktur

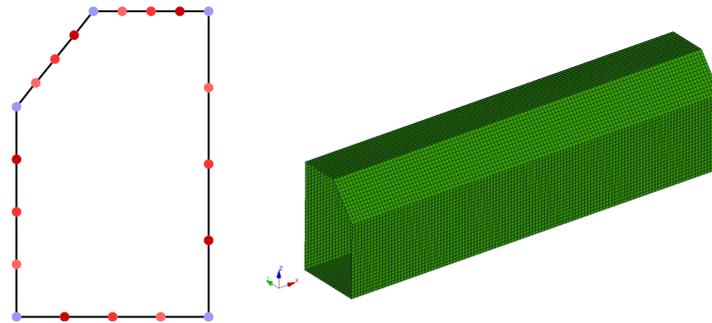


Abbildung 4.3: Graphendarstellung links; extrudiertes Finite Elemente Modell rechts

4.3 Graphenschreibung der GHT3D

Eine der Hauptanforderung ist die Erweiterung der Graphenbeschreibung um eine dritte Dimension. Für diese strukturell umfangreiche Änderung wird eine neue Graphen-Syntax eingeführt. Zu Beginn dieses Kapitels wird der hierarchische Aufbau der Graphen-Syntax-Struktur gezeigt. Im Anschluss werden die einzelnen Eingabeformate erläutert und der Aufbau anhand eines Beispiels dargestellt. Die neue Graphensyntax wurde innerhalb des Projekts von folgenden MitarbeiterInnen vom Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen entwickelt:

- Dominik Schneider
- Miriam Kick
- Florian Beyer

4.3.1 Hierachische Graphenstruktur

Im vorangegangenen Kapitel 4.2 wird die bisherige Graphensyntax zum Aufbau eines einzelnen Extrusionsprofils gezeigt. Die neue Graphen-Syntax soll das bisherige Wissen erweitern und einen möglichst flexiblen Aufbau zur Beschreibung von dreidimensionalen Modellen ermöglichen. Der konzeptionelle Ansatz soll ein Finite Elemente Modell erzeugen, welches eine Rahmenstruktur abbildet. Die Rahmenstruktur besteht im Einzelnen aus mehreren zusammengesetzten Extrusionsprofilen. Dazu wird ein übergeordneter *Graph3D* erstellt, dem die einzelnen *Edges3D* zugeordnet werden. Jede einzelne

Edge3D stellt ein einzelnes Extrusionsprofil dar, dem wiederum ein zweidimensionaler Graph zugeordnet wird. Der untergeordnete *Graph2D* beschreibt den zweidimensionalen Querschnitt des Extrusionsprofils. Abbildung 4.4 zeigt die hierarchische Graphenstruktur. Die Zuordnung von individuellen Graphen erlaubt einen flexiblen Aufbau der Rahmenstruktur mit unterschiedlichen Querschnitten. Neben der *Edges3D* werden eine Reihe von *Vertex3D* generiert, welche die Verbindungsknoten zwischen den *Edges3D* repräsentieren und im kartesischen Raum liegen. Gleiches gilt für den *Graph2D*, in dem die *Edges2D* die Beziehungen der einzelnen *Vertex2D* beschreiben und einzelne Strukturwände eines Extrusionsprofils darstellen. Die beiden Graphenvarianten werden mit der gleichen Syntax beschrieben und unterscheiden sich lediglich durch den Typ.

Im Folgenden werden die Begriffe *Vertex* bzw. *Vertices*, sowie *Edge* und *Edges* für die Elemente des Graphen verwendet. Für eine vollständige Beschreibung neben der Geometriecharakterisierung durch *Edges* und *Vertices* bedarf es einer Reihe von Informationen. Dazu werden bestimmte Keywords eingeführt und den Edges zugeordnet. Die Keywords lassen sich bedarfsorientiert in beliebiger Reihenfolge in die Graphensyntax einfügen. Zur Definition der *Edges* im dreidimensionalen Raum werden andere Keywords verwendet, als zur Erstellung von *Edges* zur Beschreibung von Strukturwänden im Querschnitt. Die Informationen werden auf den unterschiedlichen hierarchischen Ebenen benötigt. Der Erhalt der Konsistenz muss bei der Erstellung eines Graphen berücksichtigt werden. Dazu sollten, ähnlich wie im Aufbau eines Finite Elemente Modells, die physikalischen Größen einheitenlos über die Keywords übergeben werden. Die Keywords werden durch Semikolons getrennt. Jedes Element wird in eine eigene Zeile geschrieben.

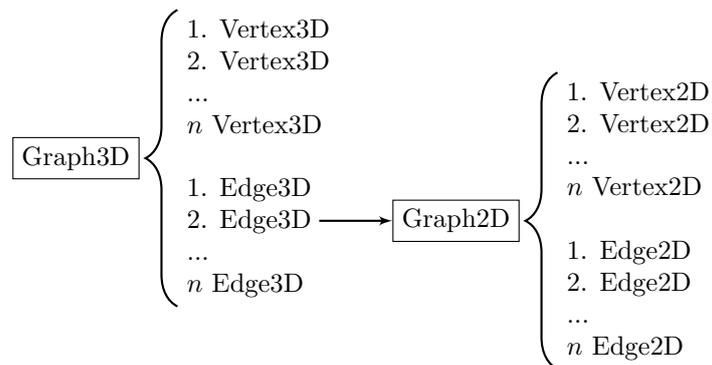


Abbildung 4.4: Hierarchische Graphenstruktur

Kennzeichnend für die neue Syntax ist, dass der *Graph* selbst als Element syntaktisch aufgeführt wird, um zwischen einzelnen Graphen zur Beschreibung von verschiedenen Querschnitten unterscheiden zu können. Anschließend werden die einzelnen Elemente aufgeführt und die Keywords mit den zu übergebenden Parametern dargestellt.

4.3.2 Graphen-Element

Das erste Element gibt den Graphen selbst wieder. Dabei werden keine geometrisch relevanten Informationen gespeichert, sondern graphenstrukturelle Informationen, wie beispielsweise die Bezeichnung. Tabelle 4.4 zeigt die Übersicht der zurzeit möglichen Parameter. Der vergebene Name wird gleichzeitig auch als Name der Finite Elemente *Inputdatei*

Tabelle 4.4: Graph-Element - Graph3D

Parameter	Datentyp	Erklärung
ID< <i>id</i> >	Integer	Identifikationsnummer
TYPE< <i>ty</i> >	String	Dient der Unterscheidung zwischen 2D- und 3D-Graph
SOURCE< <i>f</i> >	String	Unterverzeichnis für Querschnitte
NAME< <i>name</i> >	String	Bezeichnung eines Graphen

verwendet. Zu den Parametern kann eine Graphenidentifikationsnummer vergeben werden, welche individuell ist. Das Keyword *Type* definiert, um welche Art von Graphen es sich handelt. Tritt der Typ *Grid3D* auf, so handelt es sich um einen Graphen der eine dreidimensionale Struktur abbildet, die aus mehreren Extrusionsprofilen besteht. Die Syntax ist in der Auflistung 4.2 dargestellt:

Auflistung 4.2: Graph-Element

```
1 GRAPH; 1; TYPE(3DGrid); SOURCE(profilegraph); NAME(Cube)
```

Der Graph vom Typ *2DExtrusion* ist ein zweidimensionaler Graph, der den Querschnitt eines Extrusionsprofils beschreibt. Das Keyword *SOURCE* wird dazu verwendet, von dem dreidimensionalen Graphen auf den Speicherort des zweidimensionalen Graphen zu verweisen.

4.3.3 Vertex-Element

Das Vertex-Element wird über das Keyword *Vertex* identifiziert und stellt einen Strukturknoten innerhalb des 3D- und 2D-Graphen dar. Bei diesen Strukturknoten handelt es sich um Verbindungsknoten, die über das Keyword *Type* definiert sind. Wird ein Verbindungsknoten einem 2D- oder 3D-Graphen zugeordnet, erhält dieser eine Identifikationsnummer, die innerhalb des Graphen einmalig vorkommt. Die Übergabeparameter sind in Tabelle 4.5 aufgelistet. Durch die separate Nummerierung der Identifikationsnummern innerhalb der verschiedenen Graphen, bleiben die Zahlen vom Betrag gering. Das Keyword *Coordinates* beschreibt die Lage der Strukturknoten im kartesischen Raum. In der Auflistung 4.3 befindet sich die ASCII basierte Syntax zur Erstellung eines *Vertex*.

Tabelle 4.5: Vertex-Element - Vertex3D & -2D

Parameter	Datentyp	Erklärung
ID< <i>id</i> >	Integer	Identifikationsnummer innerhalb eines Graphen
TYPE< <i>ty</i> >	String	Definiert den Vertex als Link-Knoten für 2D- und 3D-Graph
COORDINATES< <i>x, y, z</i> >	Double	Beschreibt die Lage im kartesischen Raum

Auflistung 4.3: Vertex-Element

```
1 VERTEX; 1; TYPE(LINK); COORDINATES(0.0, 1.0, 1.0)
```

4.3.4 Edge-Element

Eine *Edge* beschreibt die Lage und Eigenschaften eines Extrusionsprofils im 3D-Graphen. Wenn das Element einem 2D-Graphen zugeordnet wird, stellt es eine Strukturwand im Querschnitt eines Extrusionsprofils dar. Das *Edge*-Element ist Träger einer Reihe von Informationen, die in Tabelle 4.6 beschrieben sind. Die Identifikationsnummer wird ein-

Tabelle 4.6: Edge-Element - Edge3D & -2D

Parameter	Datentyp	Erklärung
ID< <i>id</i> >	Integer	Identifikationsnummer innerhalb eines Graphen
VERTICES< <i>v₁, v₂</i> >	Integer	Zuweisen des Start- und Endknotens
TYPE< <i>ty, a₁, ..., a_n</i> >	String	Definiert die Edge für den 2D- oder 3D-Graph, weist über <i>a₁</i> einen Querschnitt zu
LENGTH< <i>l_s, l_t</i> >	Double	Beschreibt die Längen zwischen Start und Ende des Profils zu den Vertices
ORIENTATION-VECTOR< <i>x, y, z</i> >	Double	Zur Ausrichtung des Profils im kartesischen Raum
MATERIAL< <i>id</i> >	Integer	Weist eine Materialidentifikationsnr. zu
THICKNESS< <i>t</i> >	Double	Weist eine Wandstärke zu
FIX< <i>fi</i> >	Boolean	Setzt eine Edge auf fixiert

malig innerhalb eines Graphen vergeben. Damit eine *Edge* erstellt werden kann, sind zwei *Vertices* notwendig, welche der *Edge* über das Keyword *Vertex* zugeordnet werden. Die so erstellte *Edge* ist gerichtet und verläuft vom ersten zum zweiten Vertex. Eine Berücksichtigung der Extrusionsrichtung wird dann nötig, wenn unsymmetrische Profile verwendet werden. So beginnt die Extrusion immer vom Startpunkt und verläuft bis zum Endpunkt. Die Länge eines Profils oder einer Strukturwand ergibt sich aus den Abständen der zugeordneten Strukturknoten. Als nächste Angabe wird über das Keyword *TYPE* zwischen einer *Edge* für einen 3D-Graphen oder einer *Edge* für den 2D-Graphen unterschieden. Dabei handelt es sich bei der Bezeichnung *ExtrudedProfile* um die Zuordnung eines Profils für den 3D-Graphen, gefolgt von einem zweiten Übergabeparameter, der für eine Zuweisung des Querschnitts verwendet wird. Für die zweidimensionale Beschreibung erhält die *Edge* die Bezeichnung *ExtrudedWall*, wobei dann kein weiterer Parameter benötigt wird. Das Keyword *Length* wird dazu verwendet, den Start- und Endpunkt des Extrusionsprofils zu steuern. Die Längenveränderung der Extrusionsprofile wird in Kapitel 4.5 zusammen mit dem *Orientationvector* anhand eines Beispiels demonstriert. Der Orientierungsvektor ist dazu da, ein Profil im dreidimensionalen Raum auszurichten, denn nicht immer sind alle Extrusionsprofile beliebig symmetrisch. Die Ausrichtung kann Einfluss auf das strukturelle Verhalten haben. Desweiteren wird über eine Materialidentifikationsnummer die Zuweisung einer Materialkarte für die Finite Elemente Simulation angegeben. Die Syntax für eine *Edge* ist in der Liste 4.4 dargestellt.

Auflistung 4.4: Edge-Element

```
1 EDGE; 1; VERTICES(1, 2); TYPE(ExtrudedProfile, square); LENGTH(10.0,
    10.0); ORIENTATIONVECTOR(1.0, 0.0, 0.0); MATERIAL(1); FIX(false)
```

Das Keyword *Fix* wird dazu verwendet, um Grenzen der Manipulation festzulegen. Auf diese Grenzen wird in Kapitel 7.4 eingegangen. Der Aufbau der Syntax mit Keywords hat entscheidene Vorteile. Bis jetzt werden beispielsweise Vertex-Elemente mit dem Typ *Link* erstellt. Die Bezeichnung *Link* steht für Verbindungsknoten und definiert die Eigenschaften. Bei Bedarf können in Zukunft andere Knoten-Elemente mit anderen Typen hinzugefügt werden, wobei diese dann andere Merkmale erhalten können. Die Flexibilität zeigt sich bei der Verwendung von Keywords zur Beschreibung von Elementen auf unterschiedlichen Ebenen. Bei den *Edges* wird beispielsweise für die Strukturwand das Keyword *Thickness* benötigt, um eine Dicke zu definieren. Diese Angabe wird für den hierarchischen dreidimensionalen Aufbau mit *Edges* jedoch nicht benötigt, da ihr wiederum einzelne zweidimensionale *Edges* mit eigenen Eigenschaften im 2D-Graph zugewiesen sind. Bei Bedarf können auch weitere Keywords hinzugefügt werden.

4.4 Orientierung und Richtung der Profile

Bei der Erstellung eines Extrusionsprofils über die dreidimensionale Graphensyntax wird zu Beginn eine Orientierung festgelegt. Die Orientierung wird mit dem Keyword *Orientationvector* (siehe Tabelle 4.6) in der Graphensyntax berücksichtigt. Die Wirkung des Orientierungsvektors zeigt sich in Abbildung 4.5, in der drei gleiche Extrusionsprofile dargestellt sind. Die drei Profile unterscheiden sich in ihrer Ausrichtung zum globalen Koordinatensystem. Aus den abgebildeten Koordinatensystemen geht hervor, dass die Ansicht unverändert bleibt, lediglich der Orientierungsvektor wird geändert. Der Querschnitt wird zu Beginn in einem lokalen Koordinatenursprung erstellt, in dem die X- und Y-Achse betrachtet werden. Die Extrusionsrichtung verläuft entlang der Z-Achse. Danach wird über translatorische und rotatorische Koordinatentransformation das Profil entlang der *Edge3D* positioniert. Der Orientationsvektor definiert die Ausrichtung des Profils um seine eigene Achse. Hierbei wird das Profil so gedreht, dass die lokale Y-Achse in Richtung des Orientationsvektor zeigt. Die Orientierung kann dazu genutzt werden, Profile belastungsgerecht auszurichten.

Einen weiteren Einfluss kann die Reihenfolge der *Vertices* haben, die einer *Edge* zugeordnet werden. In Abbildung 4.6 ist die Auswirkung der Reihenfolge anhand eines C-Profiles demonstriert.

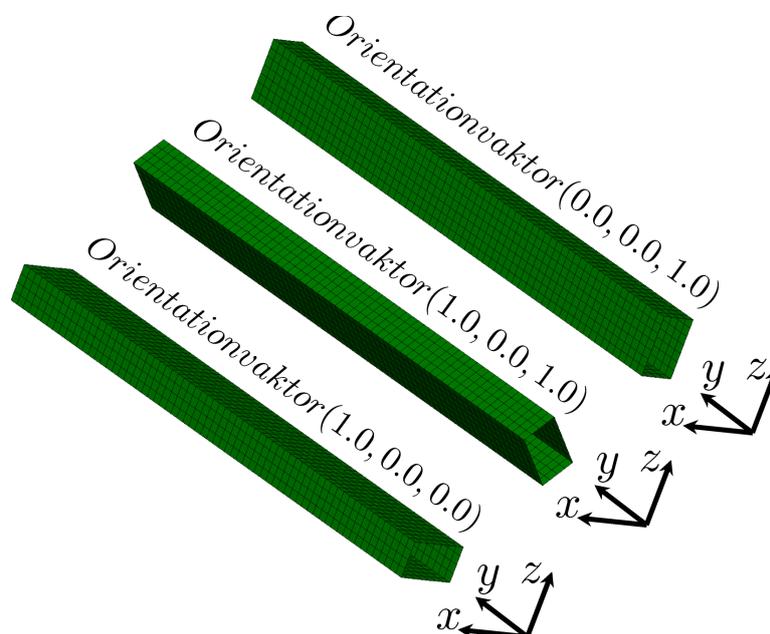


Abbildung 4.5: Steuerung der Ausrichtung durch den Orientierungsvektor

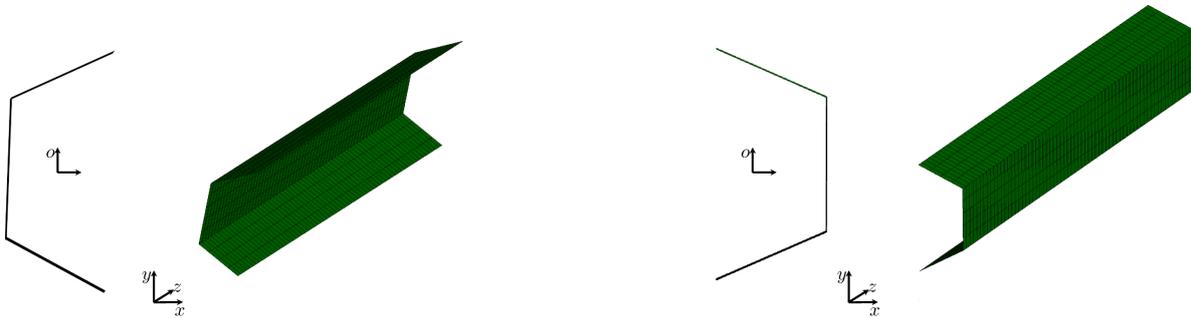


Abbildung 4.6: Darstellung einer *Edge* mit entgegengesetzter Extrusionsrichtung

Die Ansicht in Abbildung 4.6 bleibt unverändert. Daraus geht hervor, dass die *Edges* gerichtet sind. Durch den Tausch der Reihenfolge der *Vertices* in der *Edge* wird das Profil gespiegelt erstellt.

4.5 Steuerung der Profillänge

Eine weitere Einstellung zur Beschreibung der Geometrie kann mit dem Keyword *Length* erfolgen. Die *Length* definiert indirekt die geometrische Länge eines Extrusionsprofils. Dabei wird über dieses Keyword der Abstand vom Extrusionsprofil zu dem zugewiesenen *Vertex* beschrieben, also der eigentliche Start- und Endpunkt, zwischen denen das Extrusionsprofil generiert wird. Abbildung 4.7 zeigt die Manipulation der Profillänge, wobei der Abstand zwischen den beiden zugewiesenen *Vertices* gleich ist.

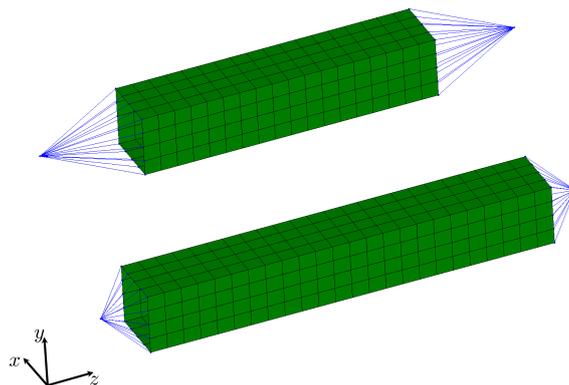


Abbildung 4.7: Steuerung der Profillänge mit dem Keyword *Length*

Die Abstände können getrennt voneinander eingestellt werden. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Verbindung zwischen dem Extrusionsprofil und einem *Vertex* mit eindimensional starren Verbindungselementen erfolgt. Dazu werden jeweils die Knotenreihen am Start und am Ende mit Ersatzknoten an den Positionen der zugeordneten *Vertices* verbunden.

In diesem Projekt werden vorläufig generische starre Verbindungsknoten als Ersatzmodell verwendet. Die Verwendung von starren Verbindungsknoten stellt eine erste Annahme dar und führt zu falschem Deformationsverhalten. Die Modellierung von Verbindungsknoten für Extrusionsprofile im dreidimensionalen Raum von beliebiger Lage und Geometrie stellt eine komplexe Aufgabe dar. In Zukunft sollen nachgiebige Verbindungsmodelle die Endstände der Profile in einem Punkt verbinden und zu adäquaten Strukturverhalten führen. Der so vom *Vertex* aus erstellte Abstand soll in Zukunft eine individuelle Möglichkeit zur Positionierung von Verbindungsknoten ermöglichen.

4.6 Beispiele zum Aufbau des Finite-Elemente Modells

In diesem Abschnitt wird eine vollständige Graphensyntax gezeigt, aus der ein rechenfähiges Finite Elemente Modell abgeleitet wird. Dazu werden mindestens zwei Dateien benötigt, die auf dem Format ASCII basieren. Die eine Datei mit dem Namen *square1* (siehe Auflistung 4.5) enthält eine zweidimensionale Graphenbeschreibung und die zweite Datei mit dem Namen *box_3D* (siehe Auflistung 4.6) wird zur Definition des dreidimensionalen Modells benötigt. Die Datei mit dem Namen *square1* beinhaltet eine Graphensyntax für den Typ *2DExtrusion* und stellt eine Querschnittsbeschreibung dar.

Auflistung 4.5: 2D-Graphenbeschreibung für einen quadratischen Querschnitt

```

1 GRAPH; 1; TYPE(2DEXTRUSION); NAME(square1)
2 VERTEX; 1; TYPE(LINK); COORDINATES(-6.0,-6.0)
3 VERTEX; 2; TYPE(LINK); COORDINATES(6.0,-6.0)
4 VERTEX; 3; TYPE(LINK); COORDINATES(6.0,6.0)
5 VERTEX; 4; TYPE(LINK); COORDINATES(-6.0,6.0)
6 EDGE; 1; VERTICES(1,2); TYPE(ExtrudedWall); THICKNESS(1); MATERIAL(1)
7 EDGE; 2; VERTICES(2,3); TYPE(ExtrudedWall); THICKNESS(1); MATERIAL(1)
8 EDGE; 3; VERTICES(3,4); TYPE(ExtrudedWall); THICKNESS(1); MATERIAL(1)
9 EDGE; 4; VERTICES(4,1); TYPE(ExtrudedWall); THICKNESS(1); MATERIAL(1)

```

Die Syntax beschreibt ein Profil mit quadratischem Querschnitt und einer Kantenlänge von 12mm , definiert durch die *Vertices* vom Typ *Link*. Für die Querschnittsbeschreibung wird der zweidimensionale Graph in der xy -Ebene erstellt. Das Profil wird in z -Richtung extrudiert und danach wird das Finite Elemente Teilmodell an den vorgesehenen Ort positioniert. In dem Finite Elemente Modell kann mit dem Keyword *Thickness* jeder Strukturwand eine Schalendicke zugewiesen werden. In diesem Beispiel sind alle Wände mit der Dicke von 1.0mm versehen. Der Ort wird durch die zwei zugewiesenen *Vertices* im 3D-Graph beschrieben. Ein wichtiges Merkmal dieser Syntax ist, dass alle Elemente in einer separaten Zeile aufgeführt werden müssen. Die Datei mit dem dreidimensionalen Graphen identifiziert sich durch den Typ *3DGrid* (Auflistung 4.6, Zeile 1). Bei der Beschreibung des Orts von *Vertices* durch die Koordinaten werden nun die drei Parameter verwendet. Der zuvor beschriebene 2D-Graph wird den *Edges* vom Typ

ExtrudedProfile mit der Querschnittsbezeichnung *square1* als zweites Argument übergeben und zugewiesen. Dadurch ist es möglich, verschiedene Querschnitte innerhalb der Rahmenstruktur zu verwenden. Für die unterschiedlichen Querschnitte können neue 2D-Graphen angelegt und verschiedenen *Edges3D* zugewiesen werden. Ähnlich wie in der Berechnung von großen Finite Elemente Modellen mit vielen Komponenten üblich, wird eine *include*-Struktur aufgebaut, dadurch bleiben die Daten übersichtlich. Die Graphensyntax wird vom Prozess eingelesen und aus den geometrischen Informationen ein Finite Elemente Modell abgeleitet.

Auflistung 4.6: 3D-Graphenbeschreibung für eine Rahmenstruktur

```

1 GRAPH; 1; TYPE(3DGrid); SOURCE(profilegraph); NAME(box_3D)
2 VERTEX; 1; TYPE(LINK); COORDINATES(-100.0, 100.0, -100.0)
3 VERTEX; 2; TYPE(LINK); COORDINATES(-100.0, -100.0, -100.0)
4 VERTEX; 3; TYPE(LINK); COORDINATES(100.0, 100.0, -100.0)
5 VERTEX; 4; TYPE(LINK); COORDINATES(100.0, -100.0, -100.0)
6 VERTEX; 5; TYPE(LINK); COORDINATES(-100.0, 100.0, 100.0)
7 VERTEX; 6; TYPE(LINK); COORDINATES(-100.0, -100.0, 100.0)
8 VERTEX; 7; TYPE(LINK); COORDINATES(100.0, 100.0, 100.0)
9 VERTEX; 8; TYPE(LINK); COORDINATES(100.0, -100.0, 100.0)
10 EDGE; 1; VERTICES(1, 2); TYPE(ExtrudedProfile, square1); LENGTH(10.0,
    10.0); ORIENTATIONVECTOR(1.0, 1.0, 0.0)
11 EDGE; 2; VERTICES(1, 3); TYPE(ExtrudedProfile, square1); LENGTH(10.0,
    10.0); ORIENTATIONVECTOR(1.0, 0.0, 0.0)
12 EDGE; 3; VERTICES(3, 4); TYPE(ExtrudedProfile, square1); LENGTH(10.0,
    10.0); ORIENTATIONVECTOR(0.0, 1.0, 0.0)
13 EDGE; 4; VERTICES(2, 4); TYPE(ExtrudedProfile, square1); LENGTH(10.0,
    10.0); ORIENTATIONVECTOR(-1.0, 0.0, 0.0)
14 EDGE; 5; VERTICES(5, 6); TYPE(ExtrudedProfile, square1); LENGTH(10.0,
    10.0); ORIENTATIONVECTOR(0.0, -1.0, 0.0)
15 EDGE; 6; VERTICES(6, 8); TYPE(ExtrudedProfile, square1); LENGTH(10.0,
    10.0); ORIENTATIONVECTOR(1.0, 0.0, 0.0)
16 EDGE; 7; VERTICES(8, 7); TYPE(ExtrudedProfile, square1); LENGTH(10.0,
    10.0); ORIENTATIONVECTOR(0.0, 1.0, 0.0)
17 EDGE; 8; VERTICES(7, 5); TYPE(ExtrudedProfile, square1); LENGTH(10.0,
    10.0); ORIENTATIONVECTOR(-1.0, 0.0, 0.0)
18 EDGE; 9; VERTICES(1, 5); TYPE(ExtrudedProfile, square1); LENGTH(10.0,
    10.0); ORIENTATIONVECTOR(0.0, 1.0, 0.0)
19 EDGE; 10; VERTICES(3, 7); TYPE(ExtrudedProfile, square1); LENGTH
    (10.0, 10.0); ORIENTATIONVECTOR(0.0, 1.0, 0.0)
20 EDGE; 11; VERTICES(4, 8); TYPE(ExtrudedProfile, square1); LENGTH
    (10.0, 10.0); ORIENTATIONVECTOR(0.0, 1.0, 0.0)
21 EDGE; 12; VERTICES(2, 6); TYPE(ExtrudedProfile, square1); LENGTH
    (10.0, 10.0); ORIENTATIONVECTOR(0.0, 1.0, 0.0)

```

Das Modell ist in Abbildung 4.8 dargestellt und bildet eine hexaederförmige Rahmenstruktur ab. Die Graphensyntax bietet eine flexible Strategie zum Aufbau von beliebigen Rahmenstrukturen. Die Erstellung der Finite Elemente Modelle wird durch die Geome-

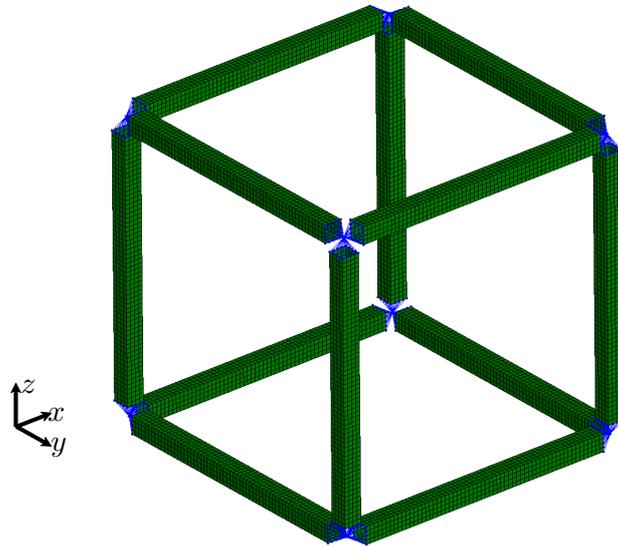
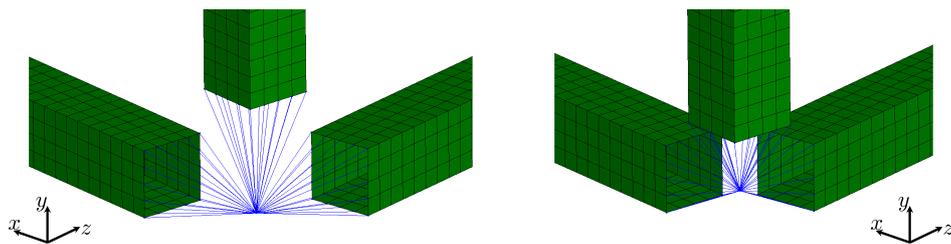


Abbildung 4.8: Finite Elemente Rahmenstruktur

Abbildung 4.9: Automatisierte Anpassung der Profillänge über das Keyword *Length* an Verbindungsknoten

trie, Art der Querschnitte und Größe der Finiten Elemente eingeschränkt. Zur sinnvollen Einschränkung der Geometrie wird in Kapitel *Geometrische Restriktionen* 7.1 eingegangen. Prinzipiell sind beliebige Graphen mit der Syntax abbildbar.

Wenn zwei oder mehrere Profile exakt bis zu den Koordinaten des *Vertex* verlaufen, würde dies zu Durchdringungen der Finite Elemente führen. Dadurch, dass Profile auch beispielsweise mit Winkeln zwischen $15^\circ < x < 45^\circ$ zusammengeführt werden können und um Durchdringungen an den Endständen der Profile zu verhindern, muss die *Length* entsprechend angepasst werden. Dazu können feste Längen für die automatisierte Erstellung der Rahmenstruktur verwendet werden. Hierbei führen zu große Werte jedoch zu großen Anteilen der starren Verbindungen. In Abbildung 4.9 ist das Ergebnis einer automatisierten Anpassung der *Length* dargestellt.

Die zuvor in der Eingabe über die Graphensyntax vergebenen Werte für *Length* werden dadurch überschrieben. Die Anpassung hat als Ziel, die Anteile von starren Elementen zu

verringern. In Zukunft kann die Einstellmöglichkeit zur Positionierung und individuellen Anpassung von Verbindungsknoten verwendet werden.

Zusätzlich zu den bisher aufgezeigten Keywords wird ein internes Label vergeben. Diese Bezeichnung wird dazu verwendet, Ergebnisse den Graphenelementen zuzuordnen und dient der Identifikation von einzelnen Elementen zum übergeordneten Graphen. Das Label wird beim Einlesen der Graphensyntax intern automatisch vergeben und wird auch bei Änderung fortgesetzt. Beim Herausschreiben von Graphen wird die Zuordnung ebenfalls herausgeschrieben. In der folgenden Abbildung ist die Aufschlüsselung des Labels in ganzer Länge des Keywords *Specifier* dargestellt.

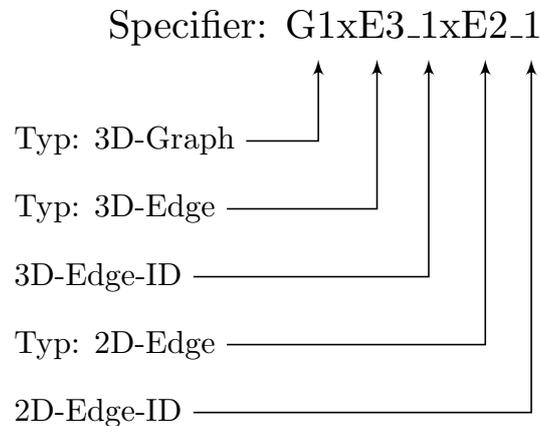


Abbildung 4.10: Aufschlüsselung des Labels zur Identifikation und Zuweisung von Informationen von Graphenelementen

Die Aufschlüsselung beinhaltet von der Reihenfolge her den hierarchischen Aufbau des Graphen. Der dreidimensionale Graph steht mit $G1$ an erster Stelle. Wenn es sich um eine *Edge* mit der Identifikationsnummer 1 vom Typ *ExtrudedProfile* handelt, wird entsprechend ein Teil: $G1xE3_1$ als Label verwendet. Der zweidimensionale Graph wird an der Stelle nicht aufgerufen, da eine Zuordnung des Graphen über die dreidimensionale *Edge E3* erfolgt. Erst bei der Betrachtung von einzelnen Strukturwänden tritt die Bezeichnung $G1xE3_1xE2_1$, $G1xE3_1xE2_2$ usw. auf. Das Label wird ebenfalls als Name für die einzelnen Komponenten der Finite Elemente Modelle fürs Post-Processing vergeben, um die Zuordnung zu erleichtern. Das bedeutet, dass sich schließlich jede Strukturwand in einer eigenen Komponentenzuordnung befindet.

5 Heuristiken zur Optimierung crashbelasteter Rahmenstrukturen

Eine Heuristik ist ein regelbasierter Ablauf, der mit wenig Informationen effizient zu einer passenden Lösung oder zumindest zu einer Verbesserung für ein Problem führt. In diesem Kapitel werden eine Reihe von Heuristiken vorgestellt, die für Vorschläge zur mechanisch sinnvollen topologischen Änderung zum Einsatz kommen. Die Heuristiken für die dreidimensionale Rahmenstruktur basieren auf den Heuristiken, die in der GHT2D [9] zur Optimierung von crashbelasteten Profilquerschnitten implementiert wurden. Für die dreidimensionale Rahmenoptimierung wurde ein Teil des Wissens extrahiert.

Prinzipiell werden Vorschläge zur topologischen Änderung auf Basis von Simulationsdaten und der individuellen Strategie einer Heuristik generiert. Für die Auswertung werden Geschwindigkeiten und Verschiebungen von Finite Elemente Knoten, sowie die innere Energie der Finite Elemente verwendet. In dem hier vorgestellten Prozess besteht keine Abhängigkeit von Heuristiken zu vordefinierten Zielfunktionen eines Optimierungsproblems. Um möglichst viele Situationen abzudecken, die sich innerhalb einer crashbelasteten Struktur ereignen können, agieren manche Heuristiken gegensätzlich. Jeder Vorschlag hat zum Ziel, die mechanischen Eigenschaften einer Struktur zu verbessern. Dies geschieht in einem konkurrierenden Prozess, indem durch das Zusammenspiel der einzelnen Abläufe eine effiziente Optimierung ermöglicht wird. An der Stelle sei auf Kapitel 6 verwiesen, in dem der Optimierungsablauf erläutert wird.

In einem Crashszenario wird die in einem System eingebrachte kinetische Energie im Idealfall durch kontrollierte Deformation absorbiert. Die Absorption kann beispielsweise durch Falten und Beulen erfolgen. Die Heuristiken verfolgen den Ansatz, verschiedene Phänomene in einer Crashsimulation zu bewerten und sollen Maßnahmen zur Verbesserung einleiten. Zu den Phänomenen zählt beispielsweise eine schnelle Deformation, die aufgrund von Stabilitätsverlust eintreten kann. Eine hohe innere Energie ist ein Indiz für plastische Deformation und kann je nach Situation als kritische Stelle identifiziert werden. Auch werden Zug- und Druckräume betrachtet. Die Leistungsfähigkeit des gesamten Verfahrens ist abhängig von der Anzahl der Heuristiken. Je mehr mechanische Phänomene betrachtet werden, desto besser können individuelle Entwürfe für verschiedene Problemstellen erzeugt werden.

Im Folgenden werden die einzelnen Heuristiken erläutert und es wird aufgezeigt, welche

Daten für die topologische Manipulation auf der Graphenebene ausgewertet werden.

5.1 Abstützen schnell deformierender Edges

In einer Crashsituation, bei dem eine Rahmenstruktur von einem Impaktor getroffen wird, kann es zu Ausknicken von Profilen kommen. Durch das betroffene Profil kann der Impaktor unter Umständen große Distanzen mit wenig Widerstand durch die Struktur zurücklegen. Um die Stabilität zu verbessern, sollen weitere Strukturelemente die Bereiche stützen und in die Deformation mit einbezogen werden. Bereiche mit Stabilitätsverlust weisen oft im Vergleich zu anderen Bereichen hohe Geschwindigkeiten auf. Die Abbildung 5.1 zeigt einen schematischen Ablauf, wie eine *Edge* aufgrund dieser schnellen Deformation gestützt werden kann. Dazu wird ein zusätzliches Strukturelement in die Rahmenstruktur eingefügt. Um die schnelle Deformation zu erkennen, wird ein Profil abschnittsweise aufgeteilt und für jeden Abschnitt ein Mittelpunkt ermittelt. Eine Charakteristik für diesen Stabilitätsverlust stellen hohe Deformationsgeschwindigkeiten in orthogonaler Richtung zur Profilachse dar.

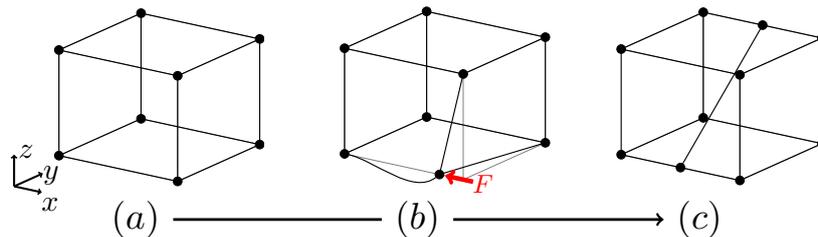


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung *Abstützen schnell deformierender Edges*: Ausgangsgeometrie (a) Schnelle Deformation unter Last (b) Neue Struktur mit unterstützender *Edge* (c)

Abbildung 5.2 zeigt die Auswertung zwischen den Zeitschritten t_0 und t_1 an den Mittelpunkten einer einzelnen *Edge*. Dazu werden die Koordinaten x, y, z der Finite Elemente in ein lokales Koordinatensystem ζ, ξ, η transformiert. Die Profilachse richtet sich dabei nach η aus. Zur Auswertung werden Geschwindigkeiten in lateraler Richtung in der $\zeta\xi$ -Ebene für jeden Zeitschritt betrachtet.

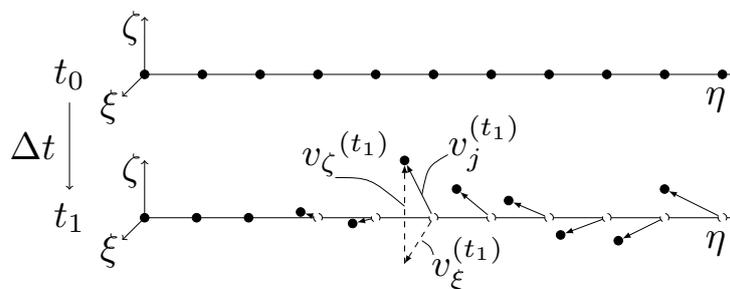


Abbildung 5.2: Auswertung für schnelle Deformation in lateraler Richtung

Die Geschwindigkeitsvektoren in axialer Richtung bleiben unberücksichtigt. Die Geschwindigkeiten in lateraler Richtung werden über alle Zeitschritte $T = \{t_0, t_1, \dots, t_{n_i}\}$ hinweg in das lokale Koordinatensystem transformiert. Die Menge $I = \{i_1, i_2, \dots, i_{n_i}\}$ beinhaltet alle dreidimensionalen *Edges*, weiterhin sind $J = \{j_1, j_2, \dots, j_m\}$ die geometrischen Mittelpunkte für eine *Edge* i und N_{fe} stellt die Anzahl der Finite Elemente Knoten dar. $\vec{p}_j^{(t)}$ beschreibt den Ort eines Mittelpunkts. Zur Bewertung wird ein Deformationsindex α_i für jede *Edge* i berechnet, der auf [10] basiert:

$$\alpha_i = \frac{1}{(N_{fe}^2 - N_{fe}) \cdot \frac{1}{2}|T|} \sum_{t \in T} \sum_{k \in J} \sum_{j \in J} \frac{|\vec{v}_j^{(t)} - \vec{v}_k^{(t)}|^2}{|\vec{p}_j^{(t)} - \vec{p}_k^{(t)}|} \quad (5.1)$$

wobei $k \neq j$ gilt. Die resultierende Geschwindigkeit $v_j^{(t)}$ eines Punktes j zum Zeitpunkt t enthält entsprechend die Anteile in Richtung ζ und ξ :

$$\vec{v}_j^{(t)} = \begin{bmatrix} v_{\zeta j}^{(t)} \\ v_{\xi j}^{(t)} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Im Anschluss wird über das arithmetische Mittel der Deformationsindices aller *Edges* normiert:

$$\tilde{\alpha}_i = \frac{\alpha_i}{\frac{1}{|I|} \cdot \sum_{j \in I} \alpha_j} \quad (5.3)$$

Auf Basis dieser Werte wird die *Edge* mit dem höchsten Indexwert ausgewählt und orthogonal mit einer bereits bestehenden *Edge* gestützt.

5.2 Nutzen von Deformationsräumen Zug und Druck

Diese Heuristiken betrachten Bereiche der Struktur, die sich aufeinander zu oder voneinander weg bewegen. Wenn ein neues Strukturelement zwischen diesen Zuständen eingebracht wird, kann dies zur Erhöhung der Stabilität führen. Durch die neue Verbindung wird eine Beteiligung bei der Deformation und Energieabsorption von verschiedenen Bereichen erzeugt. Bei Arealen, die sich voneinander weg bewegen, erzeugt die Heuristik *Nutzen von Deformationsräumen Zug* ein neues Element unter Zugbelastung. In Bereichen, die sich aufeinander zu bewegen, erzeugt die Heuristik *Nutzen von Deformationsräumen Druck* ein neues Element unter Druckbelastung. Zur Auswertung der Bereiche werden die abschnittsweise ermittelten Punkte der einzelnen Profile verwendet, die auch bei *Unterstützen schnell deformierender Edges* verwendet werden. Für ein besseres Verständnis sind die schematischen Abläufe in den Abbildungen 5.3 und 5.4 dargestellt. Im Wesentlichen evaluieren die Heuristiken die Abstände $d_{jk}^{(t)}$ zwischen den Profilmittelpunkten $\vec{p}_j^{(t)}$ und $\vec{p}_k^{(t)}$, $j \in J$, $k \in K$ von verschiedenen *Edges* über die Zeit:

$$d_{jk}^{(t)} = |\vec{p}_j^{(t)} - \vec{p}_k^{(t)}| \quad (5.4)$$

Daraufhin wird d_{com} zur Bewertung für Druck und d_{ten} zur Bewertung von Zug ermittelt, wobei $d_{jk}^{(t_0)}$ die Ausgangsdistanz aus dem initialen System ist:

$$d_{com} = \min(d_{jk}^{(t)} - d_{jk}^{(t_0)}), \quad t \in \{T, t \neq t_0\}, k \in K, j \in J \quad (5.5)$$

$$d_{ten} = \max(d_{jk}^{(t)} - d_{jk}^{(t_0)}) \quad , \quad t \in \{T, t \neq t_0\}, k \in K, j \in J \quad (5.6)$$

Als Ergebnis erzeugt jede der zwei Heuristiken einen Entwurf, bei dem jeweils die Punkte j und k verbunden werden. Daraus resultieren ein Entwurf mit einer neuen Druck belasteten *Edge* und ein Entwurf mit einer Zug belasteten *Edge*.

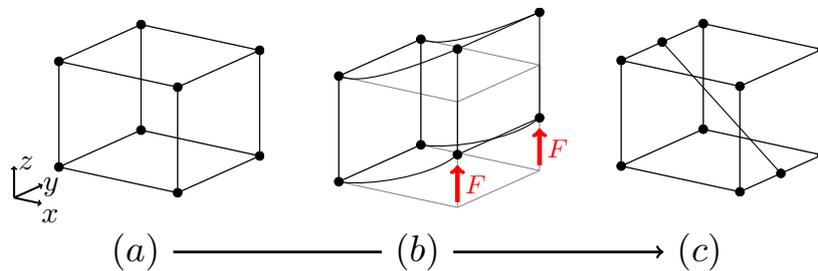


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung *Nutzen von Deformationsräumen Druck*: Ausgangsgeometrie (a) Biegefall (b) Neue Struktur mit einer auf Druck belasteten *Edge* (c)

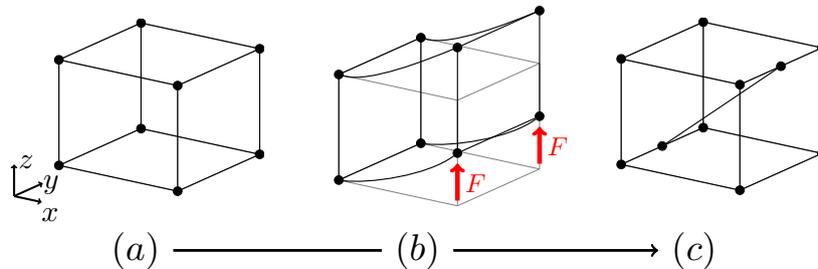


Abbildung 5.4: Schematische Darstellung *Nutzen von Deformationsräumen Zug*: Ausgangsgeometrie (a) Biegefall (b) Neue Struktur mit einer auf Zug belasteten *Edge* (c)

5.3 Teilen langer Edges

Der zugrunde liegende Gedanke besteht darin, die Reduzierung der Chance auf Knicken durch eine Reduzierung der Profillänge (Abb. 5.5) zu erreichen. Dazu werden die physikalischen Längen der Strukturelemente herangezogen, und nach ihrer Länge hin sortiert. Danach werden die längsten *Edges* durch die kürzeste Distanz verbunden. Für diese Heuristik werden keine Simulationsdaten herangezogen. Das Länge zu Breite Verhältnis eines Profils hat direkten Einfluss auf die Knickneigung.

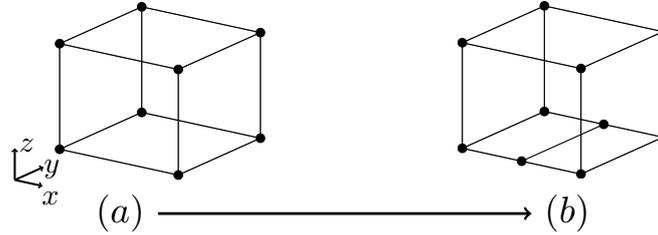


Abbildung 5.5: Schematische Darstellung *Teilen langer Edges*: Ausgangsgeometrie (a)
Erstellt eine neue *Edge* zwischen zwei langen Profilen (b)

Wenn die Länge einzelner Profile bei gleichem Profilquerschnitt reduziert wird, so wird auch die Knickneigung in Richtung der Abstützung reduziert. Die Heuristik erzeugt einen neuen Entwurf mit einem neuen Strukturelement.

5.4 Ausgleichen der Energiedichte und Löschen unbelasteter Edges

An Stellen mit starken Deformationen liegt auch eine hohe innere Energie vor. Die Heuristik *Ausgleichen der Energiedichte* versucht Bereiche mit einer hohen inneren Energie mit Bereichen niedrigerer innerer Energie zu verbinden. Der Grundgedanke liegt darin, einen Ausgleich der Bereiche durch Verbindung zu schaffen (siehe Abb. 5.6). Zur Auswertung wird die maximale innere Energiedichte ED_i , bezogen auf das Profilvervolumen V_i verwendet und berechnet sich mit:

$$ED_i = \frac{\max \left(\sum_{w \in W} E_{i,w}^{(t)} \right)}{V_i^{(t_0)}}, \quad t \in \{T, t \neq t_0\}, i \in I \quad (5.7)$$

$E_{i,w}^{(t)}$ ist die innere Energie einer einzelnen Strukturwand w zum Zeitschritt t einer dreidimensionalen *Edge* i . Die inneren Energien werden für jeden Zeitschritt aufsummiert, um zwischen verschiedenen Ereignissen von Deformationen zu unterscheiden. Durch den dreidimensionalen Aufbau können beispielsweise Deformationen an verschiedenen Stellen über die Profillänge auftreten. Danach wird der maximale Wert mit dem Volumen dividiert. Jetzt werden die Differenzen von innerer Energie zwischen verschiedenen Profilen $i, u \in I$ und $i \neq u$ betrachtet, welche wie folgt berechnet werden:

$$\Delta ED_{iu} = |ED_i - ED_u| \quad (5.8)$$

Im Anschluss werden die ermittelten Differenzen mit dem arithmetischen Mittel dividiert:

$$\widetilde{ED}_{iu} = \frac{\Delta ED_{iu}}{\frac{1}{N_{\Delta ED}} \sum \Delta ED_{iu}} \quad (5.9)$$

$N_{\Delta ED}$ ist die Anzahl der Energiedichtedifferenzen.

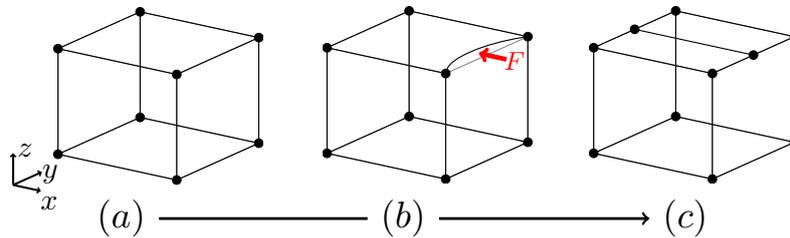


Abbildung 5.6: Schematische Darstellung *Ausgleichen der Energiedichte*: Ausgangsgeometrie (a) Auftreten hoher innerer Energie an der oberen Frontseite (b) Struktur mit neuer *Edge* (c)

Die Heuristik *Löschen unbelasteter Edges* verwendet ebenfalls wie die Heuristik *Ausgleichen der Energiedichte* die innere Energie. Die grundlegende Idee ist, wenn die maximale innere Energie einer *Edge* im Vergleich zu den anderen inneren Energien von anderen *Edges* gering ist, kann diese entfernt werden, ohne maßgeblich die strukturellen Eigenschaften zu beeinflussen. Dazu wird die innere Energiedichte auf Basis der Gleichung (4.7) errechnet und mit dem arithmetischen Mittel normiert:

$$\widetilde{ED}_i = \frac{ED_i}{\frac{1}{|I|} \sum ED_i} \quad (5.10)$$

Das Profil mit dem kleinsten Wert wird entfernt.

5.5 Skalieren der Wandstärken und Glätten des Graphen

Die Heuristiken *Skalieren der Wandstärken* und *Glätten des Graphen* gehören zu den nicht konkurrierenden Heuristiken und erzeugen nicht aktiv eine neue Topologie. Die Heuristik *Skalieren der Wandstärken* (siehe Abb. 5.8) skaliert nach der topologischen Modifikation anderer Heuristiken die Wandstärke jedes Entwurfs.

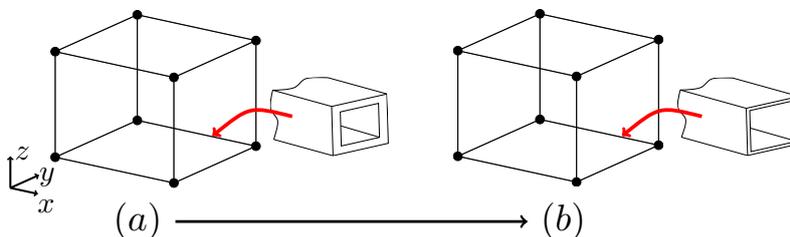


Abbildung 5.7: Schematische Darstellung *Skalieren der Wandstärken*: Ausgangsgeometrie (a) Skaliert die Wandstärken der Profile (b)

Die Wandstärke wird auf das Niveau der Masse aus der vorangegangenen Iteration skaliert, um Sprünge in der Zielfunktion zu vermeiden. Wenn ein neues Profil in die Rahmenstruktur eingefügt wird, würde die Masse der gesamten Struktur steigen. Wird ein neues

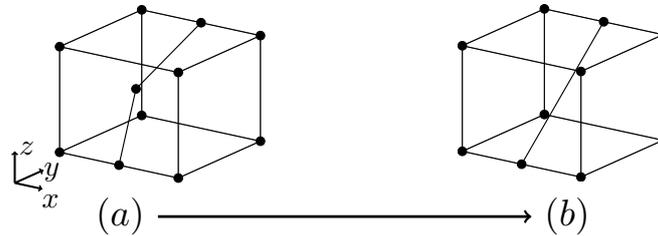


Abbildung 5.8: Schematische Darstellung *Glätten des Graphen*: Ausgangsgeometrie (a)
Begradigt zwei *Edges* (b)

Profil nach den Strategien der zuvor beschriebenen aktiven Heuristiken erstellt, werden die Wandstärken aller Profile gesenkt. Außerdem erlaubt die Heuristik so die Berücksichtigung von Massengleichheitsrestriktionen durch den gesamten Optimierungsverlauf. Umgekehrt wird im Zusammenspiel mit der Heuristik *Löschen unbelasteter Edges* die entfernte Masse der betroffenen *Edge* auf die anderen Profile durch neu Skalieren der Wandstärken umverteilt. Die Wandstärke wird mit einem Skalierungsfaktor k skaliert, um eine Zielmasse m_{target} zu erreichen. Der Faktor berechnet sich aus der aktuellen Masse $m_{current}$ mit Anteilen aus fixierter Masse m_{fixed} . Die Wandstärke aus der aktuellen Iteration wird mit dem Faktor multipliziert.

$$k = \frac{m_{target} - m_{fixed}}{m_{current} - m_{fixed}} \quad (5.11)$$

Als Ergebnis bleiben die Verhältnisse von einzelnen Wandstärken erhalten, wobei es durch den fixierten Anteil möglich ist, untere und obere Grenzen der Wandstärke zu berücksichtigen. Würde die Multiplikation mit dem Skalierungsfaktor eine Verletzung der Wandstärkenrestriktion bewirken, wird diese Wandstärke entsprechend auf das Niveau festgesetzt. Die betroffenen Massen werden fixiert und die anderen Wandstärken weiter skaliert. Die Heuristik *Glätten des Graphen* (Abb. 5.8) betrachtet die *Edges*, deren Verbindungswinkel $> 160^\circ$ beträgt. Weiterhin muss die Verbindung aus zwei zusammenlaufenden *Edges* bestehen. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, werden die zwei *Edges* durch eine *Edge* ersetzt und der nicht mehr verwendete *Vertex* entfernt. Die Heuristik wird als Ergänzung zu der Heuristik *Löschen unbelasteter Edges* verwendet.

6 Optimierungsablauf der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung

In diesem Kapitel wird der Optimierungsablauf beschrieben. Charakteristisch für das Verfahren ist die Geometriebeschreibung durch einen mathematischen Graphen. Außerdem wird das Optimierungsproblem mit zwei ineinander laufenden Optimierungsschleifen behandelt.

In der äußeren Schleife findet die topologische Modifikation durch Manipulation des Graphen durch Heuristiken statt. Im Optimierungsablauf der GHT werden mehrere Entwürfe innerhalb einer Optimierungsschleife berechnet. Jeder Entwurf wird von einer der konkurrierenden in Kapitel 5 beschriebenen Heuristiken generiert. In jeder Iteration erstellt eine Feste Anzahl N_h an Heuristiken neue Entwurfsvorschläge. Dabei werden so bis zu $N_h \cdot N_{ke}$ Berechnungen erstellt. Die Zahl N_{ke} stellt dabei die besten Entwürfe aus vorangegangener Iteration dar. Jeder Entwurf wird mit einer Finiten Elemente Simulation berechnet und die Funktionswerte werden nach ihrer Höhe sortiert. Die Optimierungsschleife bricht ab, wenn kein Entwurf mehr zu einer Verbesserung des Zielfunktionswerts führt oder die maximale Anzahl an Iterationen durchlaufen wurde.

In der inneren Optimierungsschleife können weiter mit Form- und Dimensionierungsoptimierungen einzelne Entwürfe optimiert werden. Der Ablauf kann in verschiedenen Varianten ausgeführt werden. Eine mögliche Strategie zur Ausführung der Prozedur kann wie folgt eingestellt werden: Der Ausgangsgraph wird mit einer Formoptimierung evaluiert und danach wird automatisiert die topologische Graphenmodifikation des besten Entwurfs gestartet. Nachdem die Heuristiken keine Verbesserungen mehr erzielen, kann am Ende der beste Entwurf mit einer Dimensionierungsoptimierung weiter optimiert werden, um den Zielfunktionswert weiter durch eine geänderte Materialverteilung zu minimieren. In erster Linie wurde in der Entwicklung auf einen modularen Aufbau Wert gelegt, denn für verschiedene Optimierungsziele und Lastfälle können unterschiedliche Optimierungsstrategien zu unterschiedlich guten Entwürfen führen. Die Ausführung wird dadurch ermöglicht, dass die innere Optimierungsschleife an verschiedenen Stellen aufgerufen werden kann. Anstelle der meist umfangreichen inneren Optimierung ist ebenfalls eine Bewertung der Entwürfe durch einen einzelnen Funktionsaufruf möglich. Abbildung 6.1 zeigt eine Übersicht über die Programmstruktur.

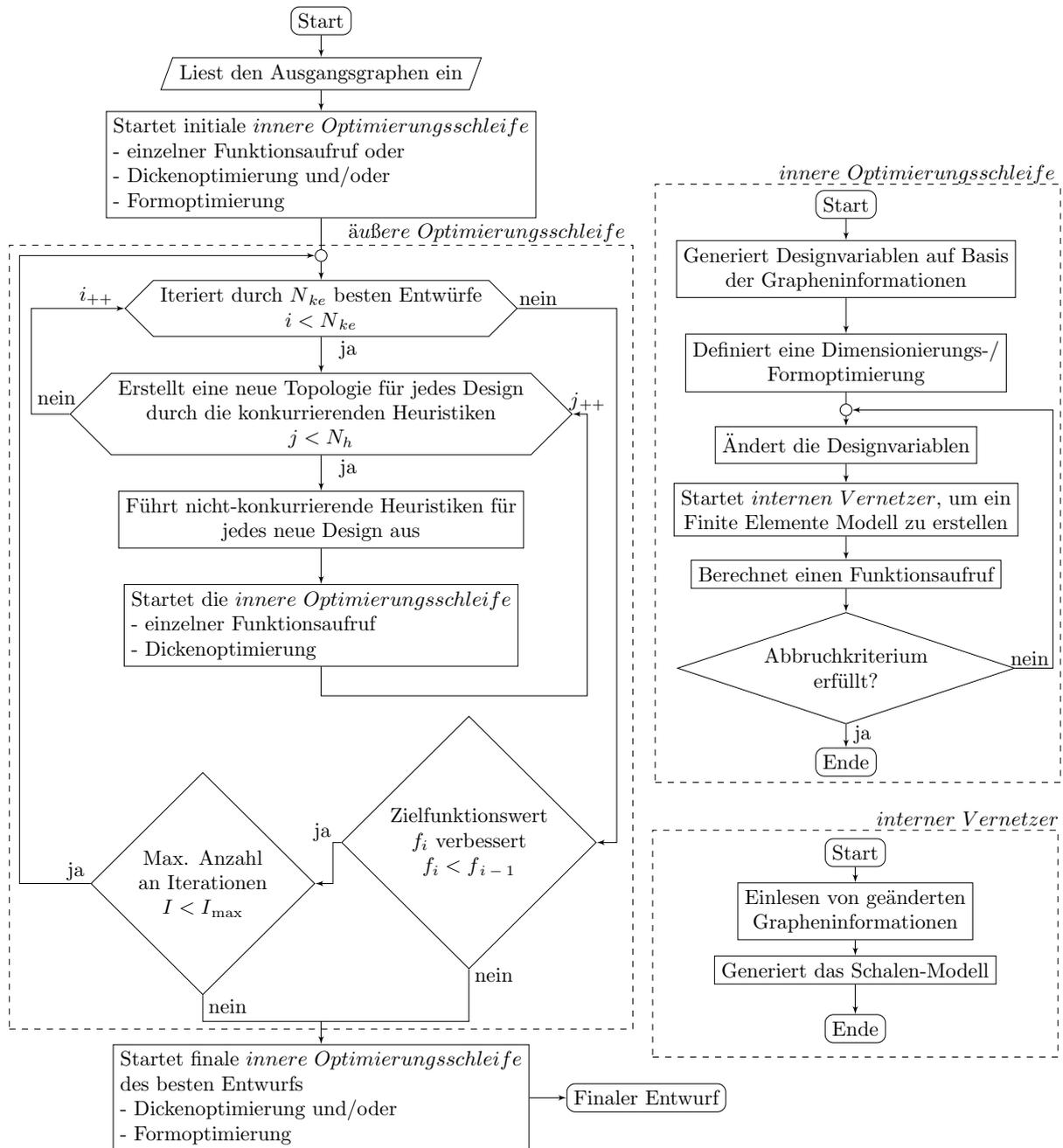


Abbildung 6.1: Ablaufdiagramm der verschachtelten Optimierungsschleifen. Die äußere Optimierungsschleife ändert die Topologie und die innere Optimierungsschleife führt Form- und Dimensionierungsoptimierungen aus

6.1 Finden von Optima in der heuristikbasierten Optimierung

Das Verfahren der GHT erzeugt mit begrenztem Wissen unterschiedliche Topologieklassen. Der Aufbau des Graphen erlaubt, Profile in beliebiger Weise in die Rahmenstruktur einzuziehen. Welche topologischen Entwürfe im Verlauf entstehen, hängt von den Simulationsdaten und den verwendeten Heuristiken ab. Die Heuristiken tasten den Entwurfsraum nur diskontinuierlich ab und dabei ist wahrscheinlich, dass nicht alle möglichen Entwürfe abgedeckt werden. Das Verfahren ist mit einer Reihe von Heuristiken ausgestattet, die zum Ziel haben, nur mechanisch begründete Entwürfe zu generieren und möglichst effizient zu einem besten Entwurf zu gelangen. Den komplexen geometrischen Möglichkeiten stehen die komplexen Zusammenhänge von physikalischen Simulationen im nicht linearen Bereich gegenüber.

Diese Zusammenhänge erschweren erheblich, dass innerhalb des Optimierungsaufbaus ein globales Optimum gefunden werden kann. Auch die Anwendung von verschiedenen mathematischen Verfahren unter Einbezug der zuvor genannten Anforderungen finden wahrscheinlich keine globalen Optima. Die hier verwendete Strategie besteht aus einer Kombination von heuristikbasierter Topologieoptimierung und mathematischen Verfahren für die Form- und Dimensionierungsoptimierung.

6.2 Software Schnittstellen im Prozess

Im Rahmen dieses Projekts wurden zur Ausführung der Optimierungsprozedur Schnittstellen zu den kommerziellen Finite Elemente Solvern LS-DYNA und RADIOSS zur Evaluation der Funktionsaufrufe implementiert. In der inneren Optimierungsschleife können in den hier vorgestellten Optimierungsdurchläufen Optimierungsalgorithmen von LS-OPT verwendet werden.

Zur Steuerung der Optimierungsabläufe und Parametereinstellung wird eine ASCII basierte Konfigurationsdatei verwendet. Die Programmabläufe sind in einer geschlossenen Java Anwendung entwickelt, bestehend aus mehreren Klassen und verschiedenen Schnittstellen. Aufgrund der Java-Runtime ist der Ablauf unter Windows und unter Linux lauffähig, so auch auf dem Rechencluster am Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen.

7 Erweiterte Graphenfunktionen

Mit der Graphenstruktur können beliebige Punkte einfach oder mehrfach in Beziehung gesetzt werden. Prinzipiell können die Entwürfe aus den Heuristiken zu sehr kleinen Strukturformationen führen. In Kapitel 4.3 wird eine Möglichkeit gezeigt, wie ein Finite Elemente Modell als Ableitung der Grapheninformationen aussehen kann. Durch die Verwendung von zweidimensionalen Graphen zur Querschnittsbeschreibung und den daraus resultierenden Profilen nimmt jede *Edge* ein definiertes Volumen ein. Dieses Volumen führt bei der Erstellung von dreidimensionalen Rahmenstrukturen zu geometrischen Einschränkungen. Eine Anforderung in der Finite Elemente Simulation ist, dass die vorgegebene Geometrie ohne Durchdringungen der Elemente diskretisiert werden muss.

Im Folgenden werden zu Beginn verschiedene Graphenfunktionen erläutert, um den Modellen geometrische Grenzen zu setzen. Danach folgt die Beschreibung zur Einhaltung von Symmetrie und am Ende eine Darstellung von möglichen Entwurfsvariablen für die innere Optimierungsschleife.

7.1 Geometrische Restriktionen auf der Graphenebene

Eine Stärke der graphenbasierten Optimierung liegt in der Überprüfung von geometrischen Restriktionen auf der Graphenebene. Durch die Vielzahl von Entwürfen muss für jede Struktur eine fehlerfreie Modellierung und, falls erforderlich, individuelle Restriktionen berücksichtigt werden. Die folgenden Restriktionen können auf der Graphenebene eingestellt werden:

- Minimale Länge einer *Edge*
- Minimaler Abstand zwischen Edges
- Minimaler Verbindungswinkel zwischen Edges
- Minimale und maximale Wandstärke
- Symmetriebedingung

Um eine minimale Länge einer *Edge* zu überprüfen, wird die Eigenschaft der Lage von *Vertices* verwendet, um über eine einfache Abstandsrechnung die Strecke im kartesischen Raum zu ermitteln. Dazu wird jedes *Vertex*-Paar überprüft, welches zu einer *Edge* gehört. Der Abstand zwischen zwei windschiefen Profilen im dreidimensionalen Raum wird ebenfalls mit der Abstandsrechnung ermittelt, wobei eine Profilachse mit mehreren Punkten approximiert wird, um dann entlang der Achse zu verfahren. Die derzeitige Durchdringungsprüfung wird dadurch abgedeckt, dass um jedes Profil ein Zylinder gelegt wird und

mit der Abstandsberechnung kombiniert mit dem Radius geprüft wird. Durchdringen sich die Zylinder, wird eine Durchdringung der Profile angenommen. Über die Abstandsregel kann eine Steuerung erfolgen, wie nah die Profile in der Struktur aneinander vorbei verlaufen dürfen. Eine weitere Restriktion, die Einfluss auf die Struktur nimmt, ist die Überprüfung von Verbindungswinkeln. Der kleinste Verbindungswinkel zwischen zwei zusammenlaufenden Profilen wird über die Richtungsvektoren ermittelt, die zwischen den zugeordneten *Vertices* gebildet werden. Ist der Verbindungswinkel zwischen Profilen zu klein, können Durchdringungen kaum vermieden werden.

Zur Steuerung der geometrischen Lage von Profilen werden die Länge, der Abstand und der Winkel verwendet, um die geometrische Modellierung mit Grenzen zu versehen. Damit werden grundlegende geometrische Randbedingungen festgelegt, die für alle generierten Entwürfe im Optimierungsprozess gelten.

7.2 Symmetrie des Graphen

Zu der Berücksichtigung von geometrischen Restriktionen können optional Symmetriebedingungen hinzugefügt werden. Bei dieser Einstellung kann der Graph in seine Oktanten zerlegt werden und für eine symmetrische Eigenschaft wird eine Spiegelung um die Koordinatenebene forciert. Die Spiegelung wird von der positiven Seite auf die negative Seite vollzogen. Im Kartesischen Raum sind hier 3 Koordinatenebenen zur Spiegelung verfügbar. Auch eine Kombination aus den Ebenen kann zur Bildung von Symmetrien eingestellt werden. Um die folgenden Ebenen kann eine Spiegelung erfolgen:

- xz -Ebene
- xy -Ebene
- yz -Ebene
- xy , xz -Ebene
- xz , yz -Ebene
- xy , yz -Ebene
- xz , xy , yz -Ebene

Für die Symmetriebedingungen muss der Graph bei der Erstellung zum globalen Koordinatenursprung ausgerichtet sein, sodass die Symmetrieebenen des Graphen der Koordinatenebenen entsprechen. Im Anschluss kann das Finite Elemente Modell durch weitere Koordinatentransformationen an den Ort für die Simulation überführt werden.

7.3 Dimensionierungsvariablen

Die Dimensionierungen werden eingesetzt, um neue Entwürfe intensiv zu bewerten, da eine Topologie nur in Ausnahmefällen ohne Justierung der Steifigkeit bzw. Dicken bewertet

werden kann.

Die Wandstärken können für jede Strukturwand des Querschnitts für sich als Entwurfsvariable definiert werden. Auch ist es möglich, dass jedes Profil für sich eine eigene konstante Wandstärke erhält. Letztlich kann die gesamte Rahmenstruktur eine konstante Wandstärke erhalten. Die Anzahl der Entwurfsvariablen hängt von der eingestellten Eigenschaft und ggf. von der Anzahl der Profile ab. In der Dimensionierungsoptimierung werden die verschiedenen Einstellungen zum symmetrischen Aufbau (Kapitel 7.2) berücksichtigt, denn die Wandstärken bleiben durch die forcierte Spiegelung ebenensymmetrisch. Bei der Veränderung der Wandstärkenvariablen kann die Massenskalierung zur Erhaltung einer Massen-Gleichheitsrestriktion verwendet werden. Die Definition von oberen und unteren Grenzen der Wandstärke kann dabei gleichermaßen berücksichtigt werden. Ein Ziel kann eine Neuverteilung der Massen durch geänderte Wandstärken sein, bei der die Ausgangsmasse der Rahmenstruktur erhalten bleibt.

7.4 Formvariablen

Ein weiterer Teil des Optimierungsverlaufs kann eine Formoptimierung zur Evaluation des Startentwurfs oder beispielsweise des besten Entwurfs sein. Die Form der Rahmenstruktur hat einen enormen Einfluss auf das mechanische Strukturverhalten und kann durch Verschieben der *Vertices* zu besseren Ergebnissen führen.

Die Definition der oberen und unteren Grenzen von Formvariablen gestaltet sich anspruchsvoller als die der Wandstärken. Jeder Verbindungsknoten kann mit 3 automatisch austarierten Entwurfsvariablen versehen werden. Das Verfahren basiert auf dem in der GHT2D verwendeten Kristallwachstum. In dieser Version wurden Rechtecke iterativ innerhalb des Querschnittes vergrößert, bis die Grenzen aneinanderstoßen. In der hier entwickelten Methode wird stattdessen ein Quader an jedem Vertex verwendet, welcher ebenfalls über mehrere Iterationen wächst, bis Grenzen aneinanderstoßen. Treffen einzelne Grenzen der Quader aufeinander, wird das Wachstum in diese Richtung deaktiviert und unter Berücksichtigung der Restriktion der minimalen *Edge*-Länge. Das Wachstum wird durch die äußere Graphen-Dimension begrenzt. In Abbildung 7.1 (a) ist ein Finite Elemente Modell abgebildet, in dem in einem zweiten Schritt das Quader-Wachstum dargestellt wird. Jedem Vertex werden 3 Entwurfsvariablen zur Beschreibung der Lage innerhalb des Graphen eingeräumt. Jeder Vertex befindet sich in einem der unterschiedlich farbigen Quader. Der Abstand zwischen den Quadern berücksichtigt die eingestellte minimale *Edge*-Länge.

Das Wachstum alleine reicht zur Einhaltung aller geometrischen Restriktionen nicht aus. In diesem ersten Schritt wird das vorhandene Volumen zunächst aufgeteilt. Damit die Einhaltung für alle Entwürfe gewährleistet ist, findet nach dem Wachstum in einem zweiten Schritt eine Prüfung der expliziten Formgrenzen statt. Durch die Auslenkung eines

Verbindungsknotens, an dem mehrere Profile zusammenlaufen, kann es durch die Verschränkung im dreidimensionalen Raum zu Durchdringungen mit anderen Profilen kommen. Um dies zu vermeiden, wird ein Vertex in die erste Ecke des zugewiesenen Quaders verschoben. Im Anschluss fahren die verbleibenden Vertices die acht Ecken ihrer zugewiesenen Quader ab und nach jeder Änderung wird der Entwurf auf die Einhaltung der geometrischen Restriktionen geprüft. Falls die eingestellten Restriktionen verletzt werden, findet eine Einschränkung der Entwurfsraumgrenzen entgegen der aktuellen Wachstumsrichtung statt. Durch die kombinierte Prüfung wird die Einhaltung der geometrischen Restriktionen gewährleistet.

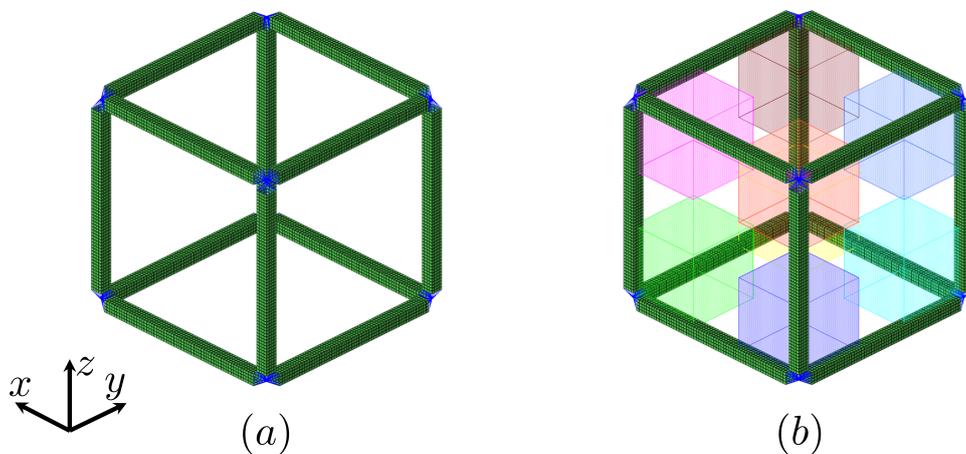


Abbildung 7.1: Ausgangsgeometrie (a) Darstellung der expliziten Grenzen der Formvariablen (b)

In Abbildung 7.2 ist die Prüfung kombiniert dargestellt, wobei die Prüfung auf der Graphenebene erfolgt und kein Finite Element Modell erstellt wird. Der rote Punkt zeigt die neue Position des Verbindungsknoten in der unteren linken Ecke des grünen Quader (Abb. 7.2 (a)). Im Anschluss wird der nächste Verbindungsknoten in eine der Ecken des blauen Quaders an die Position des roten Punktes verschoben (Abb. 7.2 (b)) und geprüft, ob beispielsweise alle Verbindungswinkel den vorher eingestellten Vorgaben entsprechen. Falls eine der Restriktionen aus Kapitel 7.1 nicht erfüllt ist, reduziert sich der zugelassene Entwurfsraum entgegengesetzt der aktuell geprüften Richtung so lange, bis der Ursprung des Quaders erreicht wird, denn die Ausgangslage befindet sich in diesem Verfahren im erlaubten Bereich.

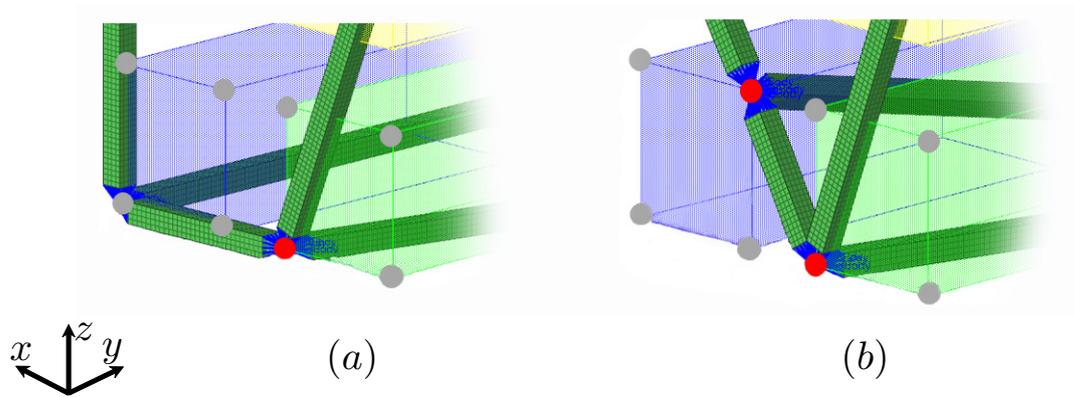


Abbildung 7.2: Erste Auslenkung des Vertex im Entwurfsraum (a) Zweite Auslenkung von 3 Formvariablen an einem anderen Vertex zur kombinierten Prüfung (b)

Tritt der Fall auf, dass eine Dimension des Entwurfsraums pro *Vertex* unter 1% der nominalen Länge der längsten Graphen-Dimension fällt, wird diese Richtung deaktiviert. Für den betroffenen *Vertex* sind dann noch zwei Richtungen entlang einer Ebene zulässig. Die Reduzierung des Entwurfsraumes kann auch auf einen eindimensionalen Fall enden bis hin zur kompletten Deaktivierung. Die Formvariablen sind mit den Symmetriebedingungen kompatibel. Das Wachstum ist auf die zu spiegelnde Seite beschränkt.

8 Integration der Crushable Frame Springs von Altair

Zusätzlich zu der Geometrieabbildung mit Schalenelementen aus Kapitel 4.3 wurde von dem Projektpartner Altair Engineering GmbH ein Modul zur Integration von alternativen 1D-Elementen entwickelt. Die 1D-Elemente (*Crushable Frame Springs* - CFS) sind Teil des Altair-Produkts C123 und basieren auf der Arbeit von Mortished et al [8]. Die CFS approximieren das Verhalten von beliebigen Profilen in Abschnitten und sollen die Effizienz in der Konzeptphase durch im Vergleich zu Schalenelement-Modellen schnellere Berechnungen steigern. Im Folgenden wird ein Ausschnitt an Informationen zu den CFS gegeben.

8.1 1D-Element zur Approximation des Verhaltens crashbelasteter Profile

C123 wurde von Altair zur Unterstützung in der Konzeptphase und im Entwicklungsprozess entwickelt. Der Name C123 steht für verschiedene Phasen im Entstehungsprozess der Fahrzeugkarosseriestruktur. In jeder Phase wird eine andere Entwicklungsstufe des *Body – in – White* in C1, C2 und C3 auf der Basis Finiter Elemente betrachtet. Die Stufe C2 ist überwiegend mit den approximierten *Crushable Frame Springs* mit verschiedenen Querschnitten und unterschiedlichen Konzepten modelliert. Die hier zusammen getragenen Informationen sind aus [1][8] entnommen und beziehen sich auf die *Crushable Frame Springs*.

Die iterative Optimierung von Fahrzeugmodellen, bestehend aus mehreren Millionen Schalenelementen ohne jegliche Modellreduzierung oder Vereinfachung, ist durch die hohe Komplexität und erforderliche Rechenzeit oft nicht möglich. Einzelne Rechnungen von Fahrzeugmodellen werden auf Hochleistungs-Rechenclustern durchgeführt. Durch die hohen Anforderungen der Entwicklungsprozesse steigt die Notwendigkeit an Maßnahmen zur Reduzierung der Komplexität. Die *Crushable Frame Springs* sind für die Approximation des Verhaltens von nicht-linearer axialer Zerdrückung (*crushing*) von dünnwandigen Profilen für Crashlastfälle entwickelt. Der Ansatz von C2 soll die schnelle Berechnung von großen Teilbereichen im Fahrzeug oder von gesamten Fahrzeugen unter Verwendung der Federelemente mit reduzierter Genauigkeit ermöglichen. Zu den betrachteten Disziplinen zählen globale Steifigkeit, Steifigkeit von Verbindungspunkten und die Betrachtung von

Crashlastfällen. Mit den reduzierten Modellen werden dann Optimierungsverfahren mit mathematischen Algorithmen anwendbar. Das Federelement (CSF) ist in *RADIOSS - Altair* als Eigenschaftskarte */prop/type44* implementiert und besitzt 6 Freiheitsgrade. Die Charakterisierung muss für ein gesamtes Profil erfolgen. Die zusammenhängenden Federelemente für das Profil werden als Segment betrachtet, zwischen denen laut Mortished [8] ein Informationsaustausch stattfindet. Die Federelemente geben den Deformationszustand an Nachbarelemente weiter. Abbildung 8.1 zeigt das beschriebene Prinzip. Beliebige zusammengesetzte Profile können in der Charakterisierung berücksichtigt werden.

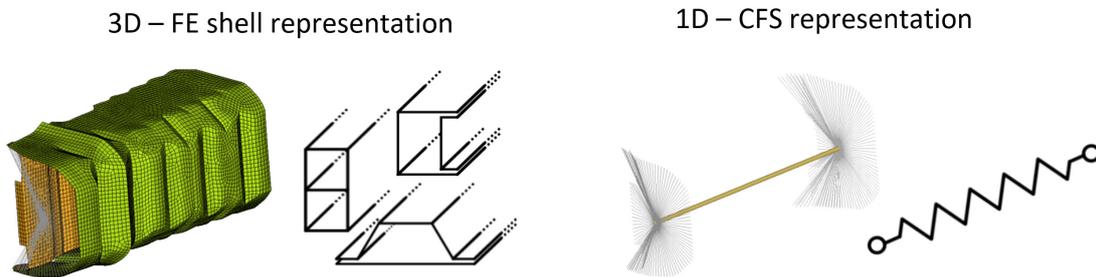


Abbildung 8.1: Darstellung der Reduzierung von Schalenmodell auf 1D-Element

Bevor die Federelemente eingesetzt werden können, muss eine Charakterisierung mit einer Reihe von Finite Elemente Rechnungen erfolgen. Das zu approximierende Profil wird separat mit verschiedenen Lastfällen beispielsweise unter Zug, Druck, Biegung und Torsion belastet. Abbildung 8.2 zeigt eine Übersicht der Lastfälle.

	tension	compression
tension compression	 fct_{X+i} fct_{X+i}	 fct_{X-i} fct_{X-i}
torsion	 fct_{XX+i} fct_{XX+i} fct_{XX+r} fct_{XX+r}	 fct_{XX-i} fct_{XX-i} fct_{XX-r} fct_{XX-r}
Bending Y	 fct_{YY1+i} fct_{YY2+i} fct_{YY1+r} fct_{YY2+r}	 fct_{YY1-i} fct_{YY2-i} fct_{YY1-r} fct_{YY2-r}
Bending Z	 fct_{ZZ1+i} fct_{ZZ2+i} fct_{ZZ1+r} fct_{ZZ2+r}	 fct_{ZZ1-i} fct_{ZZ2-i} fct_{ZZ1-r} fct_{ZZ2-r}

Abbildung 8.2: Auflistung der Lastfälle zur Charakterisierung eines Profils, aus [1]

Die Eigenschaften werden dann mittels Metamodellen approximiert und auf die 1D-Elemente übertragen. Jedes Federelement liegt zwischen zwei Finite Elemente Knoten,

wobei das gesamte Profil aus mehreren Federelementen besteht. Dabei werden Informationen zum Deformationszustand zwischen Nachbarelementen ausgetauscht. Aufgrund der Reduzierung auf 1D-Elemente sinkt die Vorhersagegüte der Simulation. Dafür senken die 1D-Elemente die Simulationsrechenzeit um ein vielfaches gegenüber einem Vollschalenmodell. Abbildung 8.3 zeigt ein Modell eines Biegequerträgers, der auf eine starre Wand trifft. Die benötigte Rechenzeit des reduzierten Modells wurde hier mit 3 Sekunden angegeben. In dem Modell wurden Biegequerträger und die vorderen Crashboxen durch 1D-Elemente ersetzt.

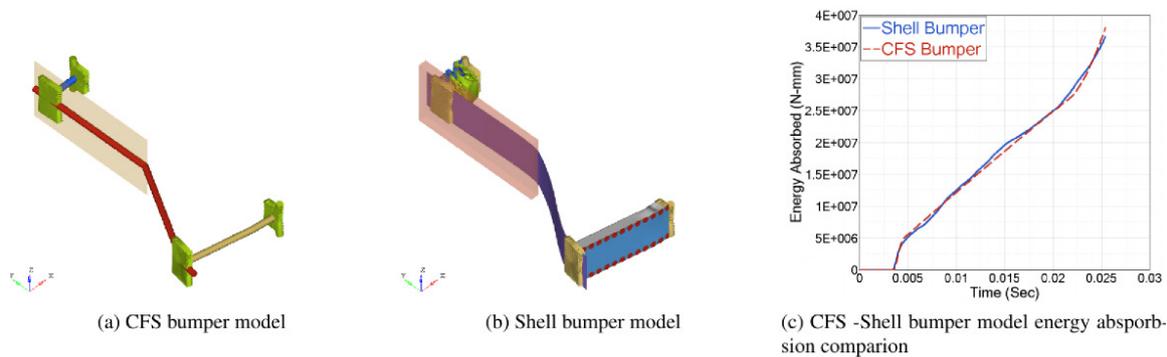


Abbildung 8.3: Vergleich eines *Crushable Frame Springs* Modell mit einem Schalenmodell eines Biegequerträgers, aus [8]

Weiterhin zeigt der Graph (Abb. 8.3), dass die Energieabsorptionskurven übereinstimmen. Innerhalb des Elements wird zwischen den Belastungsrichtungen bei den verschiedenen Freiheitsgraden unterschieden, beispielsweise bei axialer Verschiebung zwischen Zug und Druck. Jedes Element hat eine Deformationsgrenze, erreicht ein Federelement beispielsweise die maximale axiale Verschiebung unter Druck, wird dieses in einen Ruhezustand versetzt.

8.2 Die Graphen und Heuristikbasierte Topologieoptimierung mit Crushable Frame Springs

Das Ziel ist der Einsatz von *Crushable Frame Springs* bei der Berechnung der crashbelasteten Entwürfe der Graphen und Heuristikbasierten Topologieoptimierung, um eine Zeitersparnis in der Rechenzeit zu erhalten. Zur Umsetzung wurde ein Programm von Altair entwickelt, um die Vollschalenprofile automatisiert durch ein Modell mit *Crushable Frame Springs* zu ersetzen. Für die Kompatibilität können Metamodelle zur Beschreibung des Deformationsverhaltens erstellt werden und bei der automatischen Konvertierung verwendet werden. Zusätzlich sind 3 Einstellmöglichkeiten zur Verbindung der Federelemente an den Verbindungsknoten implementiert. Im Folgenden wird die Implementierung des Prozesses der GHT zusammen mit den *Crushable Frame Springs* erläutert und für den Anwender verwendbaren Programme zur Charakterisierung beschrieben. Das Teilprojekt haben folgende Mitarbeiter von Altair entwickelt:

- Charles Mortished, Altair Engineering UK
- Karthik Ramanand, Altair Engineering UK
- Rene Kaiser, Altair Engineering GmbH
- Lars Fredriksson, Altair Engineering GmbH
- Johan Gunnarsson, Altair Engineering GmbH

8.2.1 Aufbau des Prozesses innerhalb des Optimierungsablaufs

Die GHT führt die Berechnung von verschiedenen Entwürfen innerhalb einer Iteration parallel aus. Die Konvertierung der Modelle muss für den Prozess jeweils in der Programmstruktur in der inneren Optimierungsschleife (Kaptel 6) bei jedem einzelnen Entwurf ausführbar sein. Die Änderung im Prozess ist im Vergleich der Abläufe in Abbildung 8.4 dargestellt.

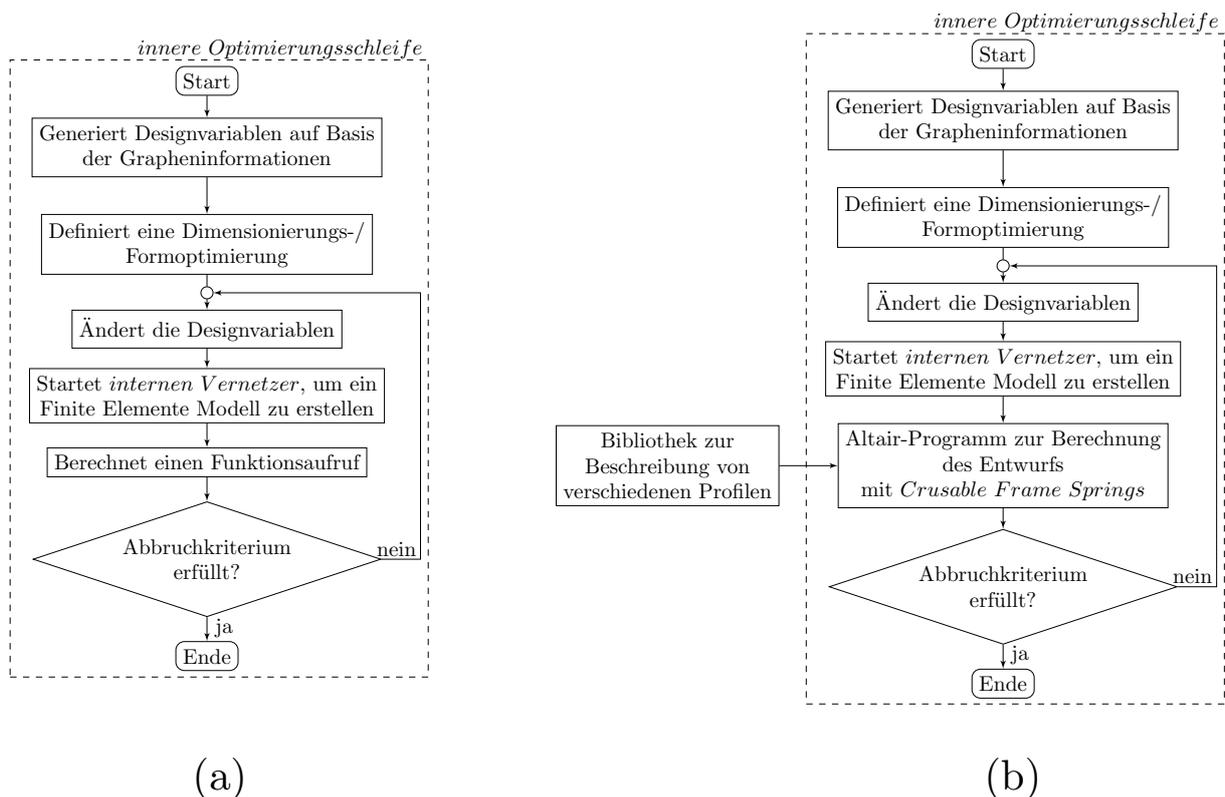


Abbildung 8.4: Innere Optimierungsschleife der GHT (a) Innere Optimierungsschleife mit *Crushable Frame Springs* (b)

Das erstellte Rahmenmodell aus Schalenelementen wird in ein Modell bestehend aus *Crushable Frame Springs* konvertiert und anschließend mit RADIOSS berechnet. Im Anschluss findet eine Extraktion von Verschiebungen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und innerer Energie zur Auswertung des Zielfunktionswertes und der Simulationsdaten für die Heuristiken statt.

8.2.2 Charakterisierung der Crushable Frame Springs über Metamodelle

Eine besondere Anforderung an die Konvertierung der Schalenmodelle aus der GHT zu einem Modell mit *Crushable Frame Springs*, stellt die Variabilität von beispielsweise Längen und Wandstärken dar. So können kurze und lange Profile in der Struktur vorkommen und während der Formoptimierung können außerdem beliebige Längen innerhalb der zulässigen Grenzen erreicht werden. Zusätzlich kann durch eine Massengleichheitsrestriktion zwischen den Iterationen die Wandstärke der Profile skaliert werden. Dadurch sind zwischen der definierten oberen und unteren Grenze beliebig Wandstärken möglich.

Die zuvor beschriebene Charakterisierung bezog sich auf die exakte Vorgabe von Werten zur geometrischen Beschreibung eines Profils. Mit dieser Vorgehensweise wären beliebig viele Profilbeschreibungen zur Abbildung der verschiedenen Entwürfe durch die Federelemente innerhalb der GHT nötig. Für dieses Projekt wurde eigens eine Erweiterung zur Parametrisierung der Eigenschaften der Federelemente entwickelt. Zur Beschreibung der Eigenschaften werden dazu Metamodelle erzeugt und in einer Bibliothek abgespeichert.

Die Erstellung der Metamodelle kann über eine Workflow-Integration im Pre-Prozessor *HyperMesh* von Altair erfolgen. Dazu kann ein Profil aus der Rahmenstruktur ausgewählt werden und dann können die dafür vorgesehenen Grenzen definiert werden. Danach wird automatisiert mit denen unter Kapitel 8.1 beschriebenen Lastfällen eine Abtastung des Entwurfsraumes (DOE - *Design of Experiments*) durchgeführt. Mit den erlangten Informationen werden für verschiedene Höhen und Breiten der Querschnitte, sowie variable Längen des Profils und verschiedenen Wandstärken, Metamodelle zur Charakterisierung der Eigenschaften aufgebaut.

Diese Vorgehensweise ermöglicht durch den Aufbau einer Bibliothek eine Verwendung von *Crushable Frame Springs* zusammen mit der GHT. Die Bibliothek muss dafür die verschiedenen Geometriebereiche von Profilen abdecken, die in der Optimierungsprozedur vorkommen.

8.2.3 Variation der Verbindungsknoten in den Modellen

Die Altair-Anwendung verfügt über 3 verschiedene Arten von Verbindungsknoten, die in den *Crushable Frame Spring* Modellen verwendet werden können. Die erste Variante erlaubt eine starre Verbindung, wie derzeit in den Schalenmodellen der GHT. Eine zweite Verbindungsart ist die Knoten-zu-Knoten Verbindung, bei der die Federelemente an ihren Enden miteinadner verbunden werden. Die letzte Möglichkeit stellt eine Variante aus den zuvor genannten Verbindungen dar. Die Enden werden mit separaten *Crushable Frame Springs* mit eigenständigen Eigenschaften, die ein Abbild der Eigenschaften der zuständigen Elemente sind, aber die mit 6 Skalierungsfaktoren beeinflusst werden können.

In Abbildung 8.5 ist eine Übersicht der möglichen Verbindungsknoten dargestellt.

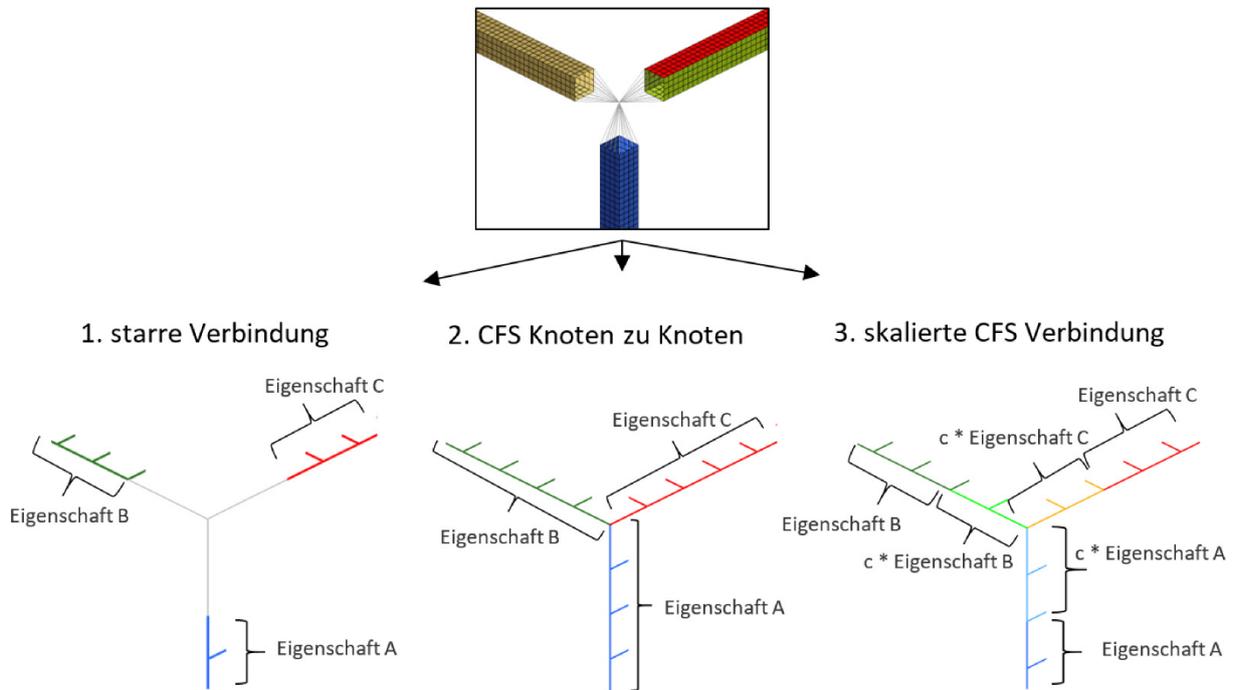


Abbildung 8.5: Auswahl von Verbindungsknoten im *Crushable Frame Spring* Modell

Die Einstellung der Faktoren bedarf einer vorangegangenen Parameterstudie zur Identifikation der Werte. Durch die einzelnen Verbindungsknoten bietet das Modul flexiblere Einsatzmöglichkeiten.

9 Anwendungsbeispiele: Crashbelasteter Rahmen

In diesem Kapitel wird die Anwendung der neuen Optimierungsprozedur für dreidimensionale Layouts von Rahmenstrukturen mit zwei Lastfällen demonstriert. Ein quaderförmiger Rahmen mit den Maßen $300\text{mm} \times 200\text{mm} \times 200\text{mm}$ zwischen den *Vertices* wird als Ausgangsmodell verwendet. Der gesamte Rahmen ist aus Profilen mit gleichen quadratischen Querschnitten mit einer Kantenlänge von 12mm zusammengesetzt. Die Elementkantenlänge der Schalen beträgt 3mm .

Im ersten Lastfall wird der Rahmen von einem Zylinder getroffen und im zweiten Lastfall wird der Rahmen von einer starren flachen Barriere zusammengedrückt. Die Lastfälle werden separat berechnet und für beide Fälle werden zwei Optimierungsprobleme formuliert. Im ersten Optimierungsablauf wird die Verschiebung des Impaktors minimiert und im zweiten Durchlauf wird die Kontaktkraft zwischen Impaktor und Rahmenstruktur minimiert. Alle geometrischen Restriktionen sind auf der Graphenebene aktiv. Außerdem ist eine Restriktion zur Begrenzung der Verschiebung des Impaktors in der letzten Iteration in der inneren Optimierungsschleife zur Minimierung der Kontaktkraft aktiv. Demzufolge können während der topologischen Modifikation noch Entwürfe mit größeren Verschiebung existieren. Prinzipiell wird mit einer Formoptimierung begonnen und anschließend mit den topologischen Modifikationen fortgesetzt. In der letzten Iteration wird eine Dimensionierungsoptimierung des besten Entwurfs ausgeführt. Die expliziten Grenzen der Formvariablen sind durch die äußere Graphen-Dimension begrenzt. Die entstehenden Entwürfe werden mit dem Finite Elemente Solver LS-DYNA explizit berechnet. Die in den Simulationen verwendete Materialkarte bildet das Verhalten von Aluminium ab und ist in Tabelle 9.1 aufgelistet. In der inneren Optimierungsschleife wird der SRSM Optimie-

Tabelle 9.1: Material card – LS-DYNA: MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY
[mm, t, sec, N]

Mid	roh	E	PR	sigy			
1	2.7e-9	70000	0.33	311.0			
eps1	eps2	eps3	eps4	eps5	eps6	eps7	eps8
0.0	0.003437	0.008593	0.01632	0.02792	0.04532	0.07143	0.1105
es1	es2	es3	es4	es5	es6	es7	es8
311.0	316.64	324.52	335.2	348.96	365.52	383.7	401.65

rungsalgorithmus von LS-OPT eingesetzt, der mit 600 Funktionsaufrufen begrenzt wird. In allen Iterationen wird eine Massengleichheitsrestriktion von 500g eingestellt. Aus der Masse ergibt sich eine Wandstärke von 1.7mm im Ausgangmodell. Alle Änderungen bezüglich der Optimierungseinstellungen werden in den einzelnen Anwendungsfällen erläutert. Die Tabellen zeigen jeweils die Zahlen des Verlaufs zum besten Entwurf. Für einen Funktionsaufruf werden ca. 10 - 15 Minuten auf 16 CPUs benötigt, abhängig von der Modellkomplexität. In der äußeren Optimierungsschleife werden die 5 besten Entwürfe in die nächste Iteration überführt. Jede der 6 aktiven Heuristiken (siehe Kapitel 5) erzeugt einen neuen Entwurf aus einem der 5 besten Entwürfe, sodass pro Iteration bis zu 30 Entwürfe entstehen können.

9.1 Rahmenstruktur: Einschlag starrer Zylinder

Die zu optimierende Struktur wird in diesem Lastfall von einem starren Zylinder getroffen (Abb. 9.1). Der Zylinder besitzt eine Masse von 9kg und bewegt sich mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 36km/h in positiver z-Richtung und ist nicht geführt. Am hinteren Ende des Rahmens sind an den 4 Eckpunkten alle Translationen und Rotationen gesperrt. Der Rahmen wird überwiegend auf Biegung mit plastischer Verformung belastet. Der äußere initiale Rahmen gibt zugleich den zulässigen Bauraum wieder. Innerhalb des Rahmens können sich Strukturen ausbilden.

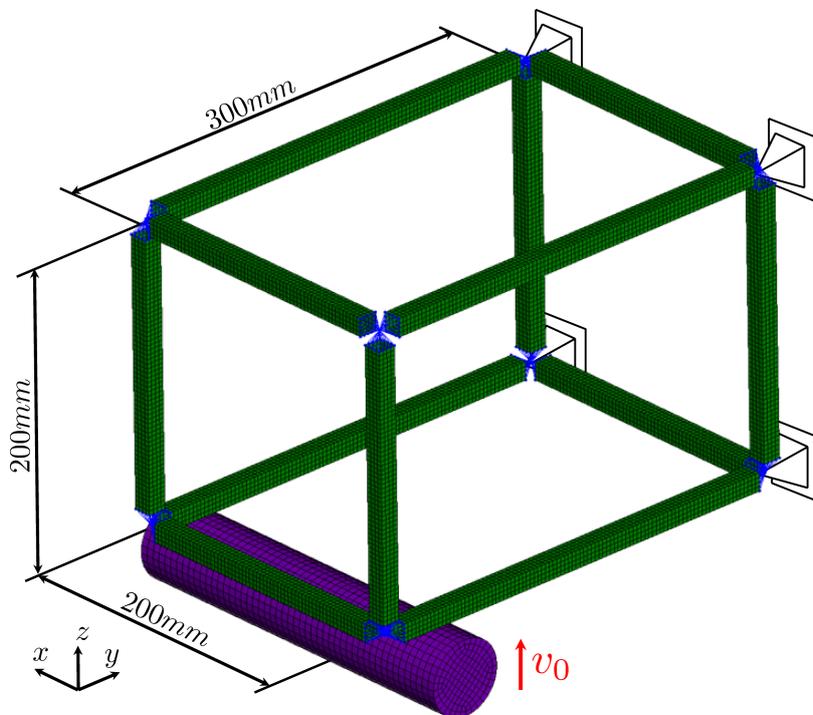


Abbildung 9.1: Startentwurf - Lastfall: Einschlag starrer Zylinder

Die Deformation über die Zeit ist in Abbildung 9.2 dargestellt. Die Rahmenstruktur wird im Folgenden mit dem Ziel optimiert, dass die Verschiebung von dem Zylinder minimiert wird. Das hat zur Folge, dass die Steifigkeit der Rahmenstruktur erhöht wird. Des Weiteren Optimierungsproblem wird die maximale Kontaktkraft zwischen dem Zylinder und der Rahmenstruktur minimiert, wobei sich der Zylinder nicht weiter als 150mm in z -Richtung bewegen soll, um ein Durchbrechen zu verhindern.

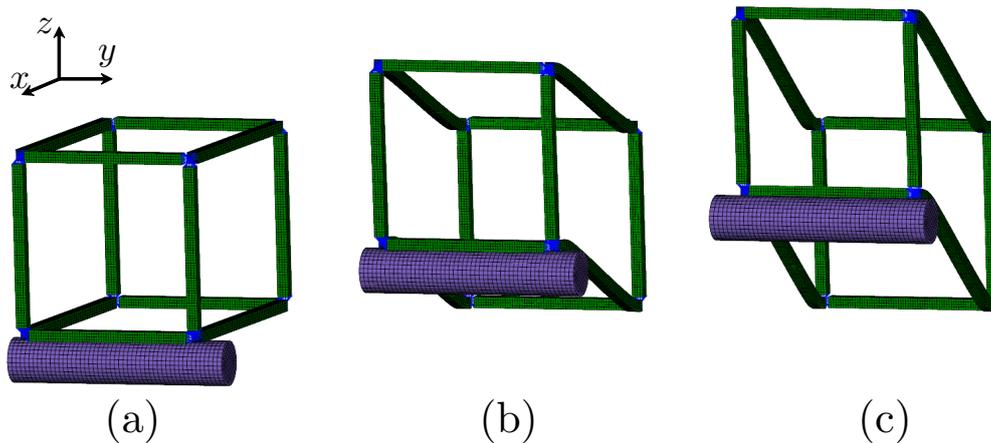


Abbildung 9.2: Ausgangsmodell Einschlag starrer Zylinder: Ausgangszustand bei $t_0 = 0.000\text{s}$ (a) Deformation bei $t = 0.015\text{s}$ (b) Deformation bei $t = 0.030\text{s}$ (c)

Der Zylinder wird nach einer Simulationszeit von 0.030s aufgehalten. Die maximale Verschiebung des Zylinders beträgt 174mm , gemessen am Schwerpunkt des Zylinders.

9.1.1 Optimierungsziel: Minimiere die Intrusion des Zylinders

In der ersten Optimierung wird die Intrusion des starren Zylinders minimiert. Die Auswertung wird am Schwerpunkt ausgeführt. Die Simulationszeit beträgt 0.040s und die Verschiebung im Ausgangsmodell beträgt 174mm . Eine Übersicht über die Restriktionen gibt Tabelle 9.2 wieder. Die geometrischen Restriktionen werden auf der Graphenebene überprüft. Einen Ausschnitt der konkurrierenden Entwürfe zwischen Iteration 1 und Iteration

Tabelle 9.2: Übersicht über die aktiven Restriktionen - Minimiere die Verschiebung des Zylinders

Restriktionen	Grenzen
Wandstärke	$0.8\text{mm} \leq x \leq 3.5\text{mm}$
Edge-Länge	$\geq 35.0\text{mm}$
Masse	$= 500.0\text{g}$
Verbindungswinkel	$\geq 15.0^\circ$
Abstand zwischen Edges	$\geq 35.0\text{mm}$
Symmetriebedingung	$xy - \text{Ebene}$

6 sind in Abbildung 9.3 dargestellt. Der finale Entwurf ist in Abbildung 9.4 dargestellt. Des Weiteren werden in der Abbildung 9.3 pro Iteration nur 6 der maximal 30 möglichen Entwürfen als Ausschnitt aufgezeigt. Zu Beginn wird mit einer Formoptimierung der Ausgangsentwurf evaluiert, denn der Startentwurf hat einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf den Verlauf der Optimierung. Aufgrund der Symmetriebedingung werden an zwei *Vertices* auf der positiven Seite des vorderen Rahmens insgesamt 6 Formvariablen erstellt. Nach der ersten Iteration ist zu erkennen, dass sich die äußere Rahmengeometrie zu einer dreieckförmigen Struktur ausbildet. Als nächstes liegt der Lastangriffspunkt des starren Zylinders am äußeren Rand der Struktur, das bedeutet, die Länge des Rahmens ist in x -Richtung verkürzt. Diese zwei Änderungen der äußeren Form haben einen großen Einfluss auf den Zielfunktionswert. Die Optimierungshistorie ist in Tabelle 9.3 aufgelistet und zeigt eine Reduzierung des Funktionswerts auf $30.45mm$ in der ersten Iteration. Einen etwas kleineren Einfluss hat die Schmälerung des Rahmens von den Einspannungen

Tabelle 9.3: Optimierungshistorie – starrer Zylinder: Minimiere die Verschiebung

Iteration [-]	Zielfunktionswert [mm]	Änderung [-]	Funktionsaufrufe [-]
<i>Startentwurf</i>	174.34	-	1
0	30.45	6 Formvariablen	600
1	25.29	heurist. Manip.	6
2	22.88	heurist. Manip.	28
3	20.71	heurist. Manip.	26
4	20.42	heurist. Manip.	19
5	19.72	heurist. Manip.	24
6	15.60	15 Dim.variablen	618

im Verlauf zum Lastangriffspunkt, dadurch erhöhen sich bei gleichbleibender Masse die Wandstärken. Im Anschluss der Formoptimierung werden automatisiert in parallelen Prozessen in jeder Iteration die neu entstandenen Entwürfe berechnet. Durch den Aufprall des Zylinders entsteht am oberen Bereich der dreieckförmigen Struktur schnelle Deformation. Die Heuristiken ziehen traversenartig weitere Profile im symmetrischen Aufbau ein.

In dieser topologischen Graphenmanipulation kann der Zielfunktionswert nach der Formoptimierung noch weiter verbessert werden. Weiterin fällt auf, dass im Bereich der Einspannungen zwei Profile in Iteration 2 und Iteration 5 entfernt werden und die gesamte Masse auf die anderen Profile umverteilt wird. Nach Iteration 5 wird von den Heuristiken kein besserer Entwurf mehr gefunden und eine Evaluation der Wandstärken wird abschließend ausgeführt. Die Anzahl der Wandstärkenvariablen sind durch die Symmetriebedingungen beschränkt. In Abbildung 9.4 C) ist zu erkennen, dass der Zylinder zurückprallt. Der beste Entwurf begrenzt die Verschiebung des Zylinders auf $15.60mm$.

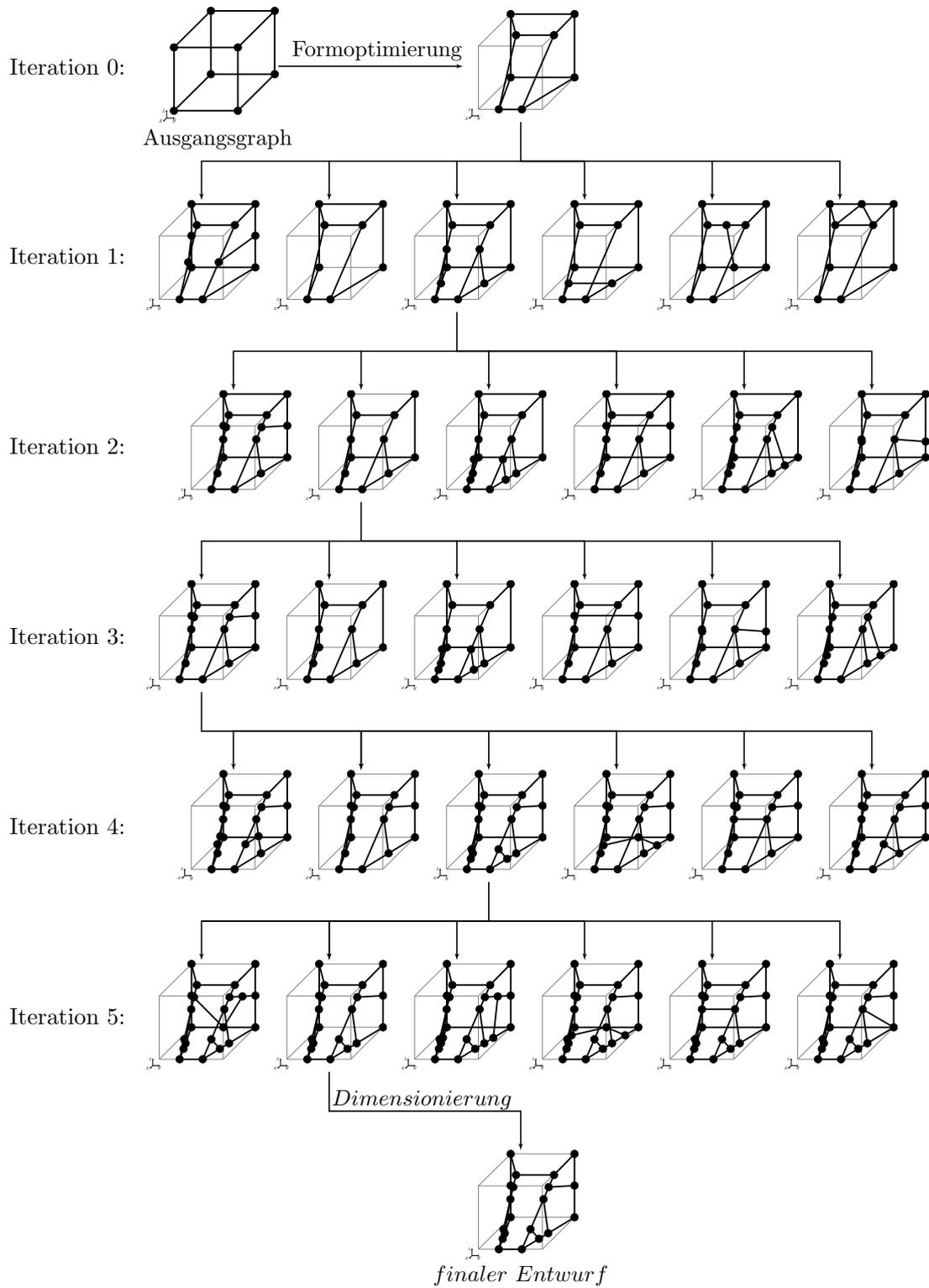


Abbildung 9.3: Ausschnitt aus der Graphenmodifikation zwischen Iteration 1 und Iteration 6 - Minimiere die Intrusion des Zylinders

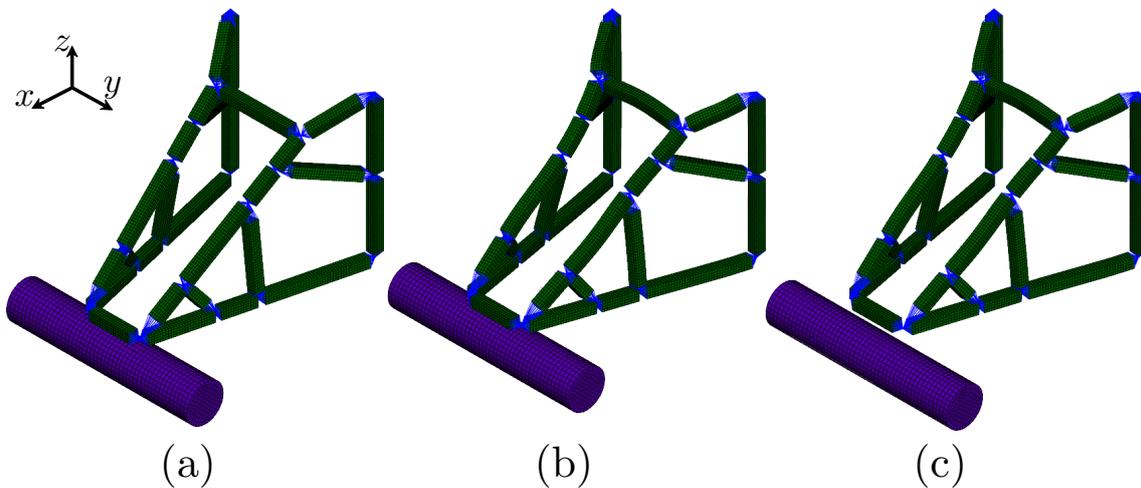


Abbildung 9.4: Bester Entwurf, Einschlag starrer Zylinder, minimiere die Verschiebung:
 Ausgangszustand bei $t_0 = 0.000s$ (a) Deformation bei $t = 0.003s$ (b)
 Deformation bei $t = 0.010s$ (c)

9.1.2 Optimierungsziel: Minimiere die Intrusion des Zylinders mit Crushable Frame Springs

An dieser Stelle wird der Optimierungsablauf zur Minimierung der Intrusion des Zylinders am Rahmen ein weiteres Mal mit den gleichen Einstellungen gestartet. In diesem Durchlauf wird anstelle der Profile, bestehend aus Schalenelementen, die *Crushable Frame Springs* zur Abbildung der Rahmenstruktur verwendet. Das entwickelte Modul zur Konvertierung der Simulationsmodelle ist in den Ablauf der GHT implementiert und kann ausgeführt werden.

Zur besseren Vergleichbarkeit zwischen dem LS-DYNA-Modell, dem RADIOSS-Modell und dem *Crushable Frame Springs* Modell, wird die erste Variante mit starren Elementen als Verbindungsknoten gewählt. Für das RADIOSS-Modell wurde die LS-DYNA Materialkarte aus der Einleitung in Kapitel 9 für das Materialmodell *MATLAW14_1* übertragen. Auch in der Charakterisierung der *Crushable Frame Springs* wird diese Materialkarte verwendet.

Aus dem vorangegangenen Optimierungsverlauf geht hervor, dass die Simulationszeit zur Berechnung der Intrusion des Zylinders auf $t = 0.020s$ reduziert werden kann. Erkennbar an den Modellen aus Iteration 1, denn dass Ereignis des Einschlags ist innerhalb kürzester Zeit vollzogen. Außerdem können Erkenntnisse zum Strukturverhalten und Information über die entstandenen Größen zur Profillänge und der Wandstärken gewonnen werden, die während der Optimierung auftreten. Für die Charakterisierung der 1D-Elemente wurde über die Metamodelltechnik die benötigten Bereiche abgedeckt. Tabelle 9.4 zeigt die entstandene Bibliothek zur Beschreibung des Verhaltens der Federelemente für quadratische

Tabelle 9.4: Übersicht über die Bibliothek der Bereiche zur Beschreibung des Verhaltens der Profile mit quadratischem Querschnitt, die durch die *Crushable Frame Springs* abgedeckt werden

Nummer [-]	Höhe [mm]	Breite [mm]	Profillängenbereich [mm]	Wandstärke [mm]
1.	10.8-13.2	10.8-13.2	35-100	1.0-1.5
2.	10.8-13.2	10.8-13.2	35-100	1.5-2.0
3.	10.8-13.2	10.8-13.2	35-100	2.0-2.5
4.	10.8-13.2	10.8-13.2	100-150	1.0-1.5
5.	10.8-13.2	10.8-13.2	100-150	1.5-2.0
6.	10.8-13.2	10.8-13.2	100-150	2.0-2.5
4.	10.8-13.2	10.8-13.2	150-200	1.0-1.5
5.	10.8-13.2	10.8-13.2	150-200	1.5-2.0
6.	10.8-13.2	10.8-13.2	150-200	2.0-2.5
7.	10.8-13.2	10.8-13.2	200-250	1.0-1.5
8.	10.8-13.2	10.8-13.2	200-250	1.5-2.0
9.	10.8-13.2	10.8-13.2	200-250	2.0-2.5
10.	10.8-13.2	10.8-13.2	250-300	1.0-1.5
11.	10.8-13.2	10.8-13.2	250-300	1.5-2.0
12.	10.8-13.2	10.8-13.2	250-300	2.0-2.5

Querschnitte. In Abbildung 9.5 wird die maximale Verschiebung des Zylinders in Richtung der Z-Achse im Vergleich dargestellt. Die Modelle liegen im Bereich der Verschiebung nah beieinander, wobei der Rahmen mit *Crushable Frame Springs* geringfügig weniger Steifigkeit bietet.

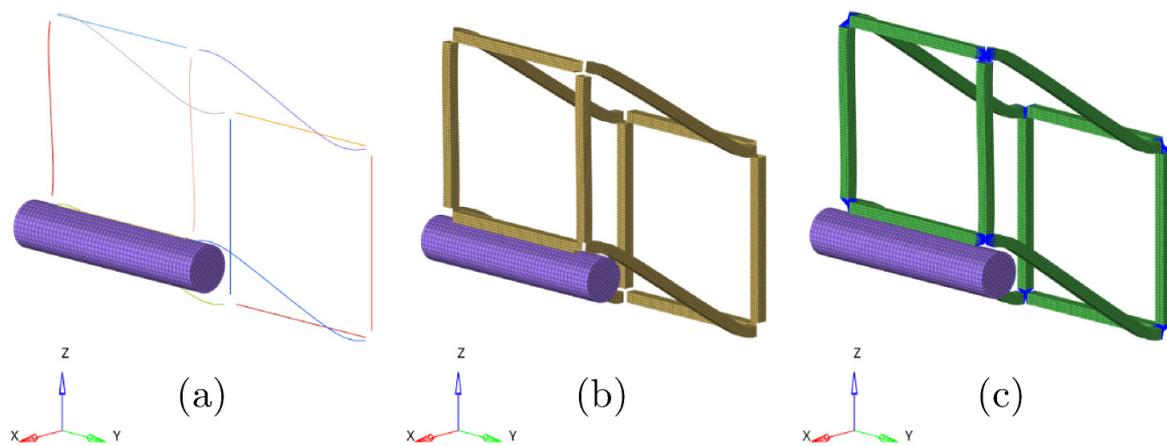


Abbildung 9.5: Vergleich des Rahmenmodells - Einschlag starrer Zylinder für ein Simulationszeit $t = 0.020s$: *Crushable Frame Springs* Modell, Verschiebung: 159.50mm (a) RADIOSS-Schalenmodell, Verschiebung: 140,34mm (b) LS-DYNA-Schalenmodell, Verschiebung 147,30mm (c)

Die benötigte Rechenzeit des *Crushable Frame Springs* Modell ist mit 5.91s vom Solver angeben. Die Optimierungshistorie ist in Tabelle 9.5 aufgelistet. Die Optimierung wird mit einer Formoptimierung mit 6 Formvariablen begonnen. In diesem Verlauf ist eine ähnliche

Tabelle 9.5: Optimierungshistorie – starrer Zylinder: Minimiere die maximale Verschiebung - CFS

Iteration [-]	Zielfunktionswert [mm]	Änderung [-]	Funktionsaufrufe [-]
<i>Startentwurf</i>	159.50	-	1
0	32.42	6 Formvariablen	600
1	27.24	heurist. Manip.	6
2	26.09	heurist. Manip.	27
3	24.81	heurist. Manip.	27
4	24.61	heurist. Manip.	15

Struktur entstanden, wie im Beispiel mit Schalenelementen. Die Verschiebungen liegen, wie auch im Vergleich des Ausgangsmodells, auf einem leicht höheren Niveau. Im direkten Vergleich der Abläufe hat die Formoptimierung eine dreieckförmige Rahmenstruktur ergeben. Die Struktur ist dabei etwas breiter ausgefallen. Die zwei *Edges* im hinteren Bereich der Struktur an den Einspannungen wurden ebenfalls entfernt und die Masse wurde auf die restlichen Profile umverteilt. Die vier traversenartigen Profile im vorderen Bereich der Struktur sind in Iteration 1 und Iteration 4 generiert worden und auch im Beispiel mit den Schalenmodellen vorhanden. Trotz des stark ähnlichen Verhaltens sind im hinteren Bereich Abweichungen erkennbar. Die stützenden Profile nahe der Einspannung sind in diesem Durchlauf nicht entstanden. Eine Nachrechnung mit dem RADIOSS-Schalenmodell zeigt eine sehr geringe Abweichung (siehe Abbildung 9.6).

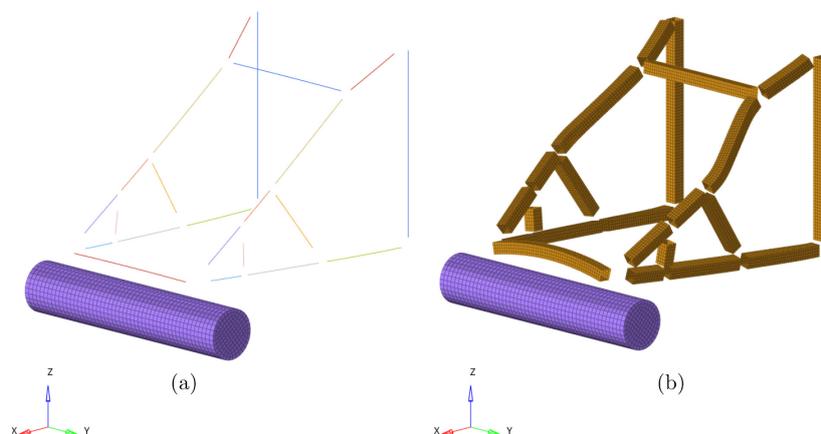


Abbildung 9.6: Vergleich des Rahmenmodells - Einschlag starrer Zylinder bei der Simulationszeit $t = 0.010s$: *Crushable Frame Springs* Modell, Verschiebung: 24.61mm (a) RADIOSS-Schalenmodell, Verschiebung: 23,94mm (b)

Dadurch, dass die Struktur im vorderen Bereich breiter ist als die aus dem Durchlauf mit den Schalenelementen, fällt die Verschiebung geringfügig schlechter aus. Die Wandstärken sind durch die Massenerhaltung in der gesamten Struktur geringer. Zum einen können die Abweichungen auf das prinzipielle Verhalten der reduzierten Wiedergabegenauigkeit der 1D-Elemente zurück geführt werden, aber zum anderen auch auf eine ggf. vorhandene Abweichung der Daten aus den Metamodellen. Für eine bessere Beschreibung könnten in Zukunft die Daten der Metamodelle genauer bestimmt werden, indem die Bereiche kleiner gewählt werden. Ein weiterer Punkt stellt die Anzahl an Stützstellen der Metamodelle dar, die bis hier hin mit 200 Stützstellen pro Charakterisierung zu gering ist. Eine Einsparung für das hier demonstrierte Modell könnte durch den Verzicht auf die Angabe von Bereichen in der Höhe und Breite als Variablen im Entwurfsraum sein. Mit einer Rechenzeit von ca. 6 Sekunden pro Funktionsaufruf können aber auch neue Strategien mit weit aus mehr Funktionsaufrufen in der Formoptimierung ausgeführt werden. Die aufgebaute Bibliothek kann auch in weiteren Optimierungsdurchläufen verwendet werden.

9.1.3 Optimierungsziel: Minimiere die maximale Kontaktkraft des Zylinders

In der zweiten Optimierung wird die maximale Kontaktkraft zwischen dem Zylinder und dem Rahmen minimiert. Die eingestellten Restriktionen bleiben wie im vorangegangenen Beispiel unverändert. Für diesen Fall wird eine zusätzliche Restriktion eingefügt. Der Rahmen soll den Zylinder spätestens stoppen, wenn dieser einen Weg von 150mm zurück gelegt hat, damit dieser nicht durch die Rahmenstruktur durchbricht. Die Restriktionen sind in Tabelle 9.6 aufgelistet.

Tabelle 9.6: Übersicht über die aktiven Restriktionen - Minimiere die maximale Kontaktkraft des Zylinders

Restriktionen	Grenzen
Verschiebung Zylinder	$\leq 150\text{mm}$
Wandstärke	$0.8\text{mm} \leq x \leq 3.5\text{mm}$
Edge-Länge	$\geq 35.0\text{mm}$
Masse	$= 500.0\text{g}$
Verbindungswinkel	$\geq 15.0^\circ$
Abstand zwischen Edges	$\geq 35.0\text{mm}$
Symmetriebedingung	$xy - Ebene$

Der Optimierungsablauf bleibt unverändert und der Startentwurf (Abb. 9.1) wird mit einer Formoptimierung mit 6 Variablen evaluiert. Die Optimierungshistorie ist in Tabelle 9.7 aufgelistet. Die Formoptimierung reduziert die Kraft auf 8420N .

Aufbauend auf diesem Entwurf erzeugen die Heurstiken im konkurrierenden Verfahren über mehrere Iteration bis zu 30 neue Entwürfe pro Iteration. Über 7 Iterationen wird

Tabelle 9.7: Optimierungshistorie – starrer Zylinder: Minimiere die maximale Kontaktkraft

Iteration [-]	Zielfunk. [N]	Verschiebung [mm]	Änderung [-]	Funkt. [-]
<i>Startentwurf</i>	10015	174.34	-	1
0	8420	128.34	6 Formvariablen	600
1	8270	129.84	heurist. Manip.	6
2	8169	98.88	heurist. Manip.	28
3	7746	137.79	heurist. Manip.	26
4	7447	137.79	heurist. Manip.	19
5	6751	128.03	heurist. Manip.	24
6	6733	128.48	heurist. Manip.	24
7	6732	129.23	heurist. Manip.	24
8	5387	149.99	19 Dim.variablen	627

die maximale Kontaktkraft so weiter reduziert. In Iteration 8 ist es nicht mehr möglich, durch Kombination der Heuristiken eine Verbesserung zu erzielen und der beste Entwurf wird mit einer Dimensionierungsoptimierung abschließend optimiert. Der beste Entwurf mit der neuen Wandstärkenverteilung liegt bei einer maximalen Kontaktkraft von $5387N$ und der Zylinder nutzt mit $149.99mm$ die gesamte zulässige Verschiebung aus. Die Deformation ist in Abbildung 9.7 dargestellt.

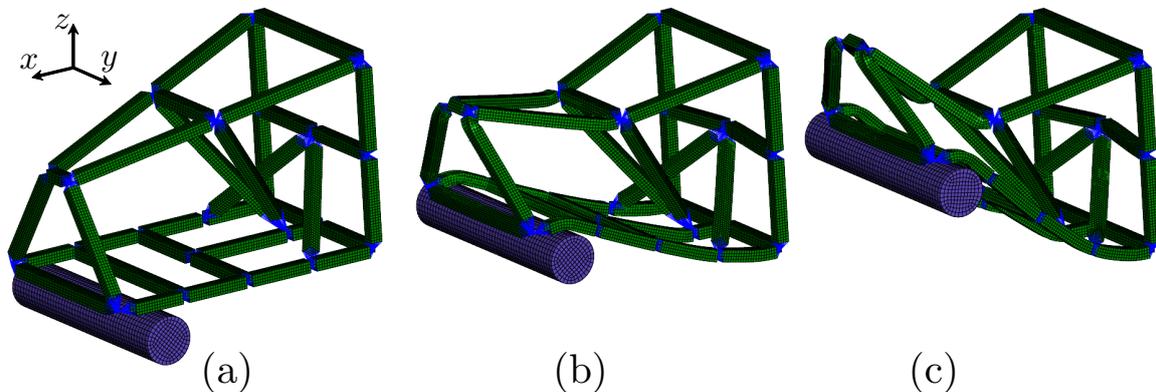


Abbildung 9.7: Bester Entwurf, Einschlag starrer Zylinder, minimiere die maximale Kontaktkraft: Ausgangszustand bei $t_0 = 0.000s$ (a) Deformation bei $t = 0.010s$ (b) Deformation bei $t = 0.030s$ (c)

Die äußere Rahmenform hat sich in der Formoptimierung im vorderen oberen Bereich geschmälert und es ist in Abbildung 9.7 c) zu erkennen, dass dies eine Begünstigung der Deformation zur Folge hat. Der Rahmen lässt sich in zwei Bereiche unterteilen. Der vordere Bereich nahe des Einschlags gestaltet sich eher nachgiebig, während sich im hinteren Bereich nahe der Einspannung zusätzliche Profile ausgebildet haben. Demzufolge liefert der hintere Bereich des Rahmens die nötige Steifigkeit, um den Zylinder vor $150mm$ Ver-

schiebung zu stoppen. In Abbildung 9.8 ist der Kontaktkraftverlauf über die Verschiebung dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass sich das Niveau vom besten Entwurf leicht über dem des Startentwurfs befindet. Wenn an dieser Stelle noch mal die Deformationen des Startentwurfs herangezogen werden (Abb. 9.2), fällt auf, dass durch den längeren Verzögerungsweg von ca. 174mm eine niedrigere Beschleunigung möglich ist. Dennoch wird durch den Optimierungsverlauf die Restriktion von 150mm eingehalten.

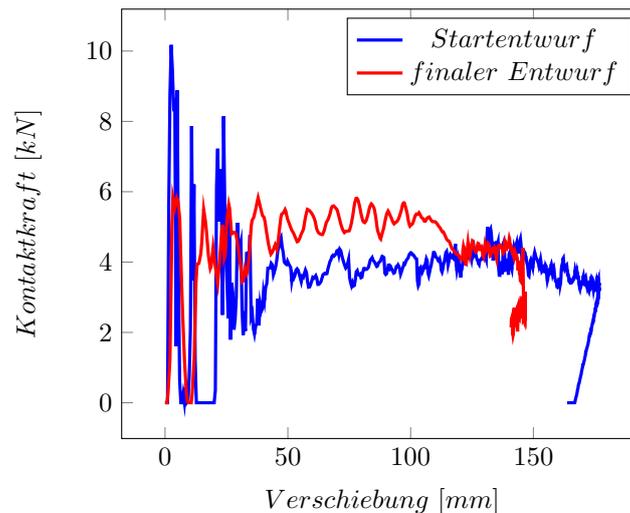


Abbildung 9.8: Kraft-Weg-Verlauf im Modell: Einschlag starrer Zylinder - Minimiere die maximale Kontaktkraft

9.2 Rahmenstruktur: Einschlag starre Wand

Im zweiten Beispiel wird der Lastfall geändert und der Rahmen wird von einer starren Wand zusammengedrückt. Der Lastfall ist in Abbildung 9.9 dargestellt. Die abgebildeten Einspannungen sperren wieder alle translatorischen und rotatorischen Freiheitsgrade an den vier Eckpunkten am hinteren Ende des Rahmens. Die starre Wand besitzt eine Masse von 65kg und bewegt sich mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 36km/h in positiver y -Richtung und ist geführt. Der Rahmen wird zusammengestaucht, wobei sich die einzelnen Profile in Lastpfadrichtung mit plastischer Verformung verbiegen. Der äußere initiale Rahmen gibt zugleich den zulässigen Bauraum wieder. Innerhalb des Rahmens können sich Strukturen bilden. Mit diesem Ausgangsmodell und der zu Beginn vergebenen kinetischen Energie ist es nicht möglich, mit der derzeitigen Struktur die starre Wand aufzuhalten. Die Deformation über die Zeit ist in Abbildung 9.10 dargestellt. Die Rahmenstruktur wird im Folgenden mit dem Ziel optimiert, dass die Verschiebung der starren Wand minimiert wird. Daraus resultierend soll die Rahmenstruktur eine möglichst hohe Steifigkeit haben.

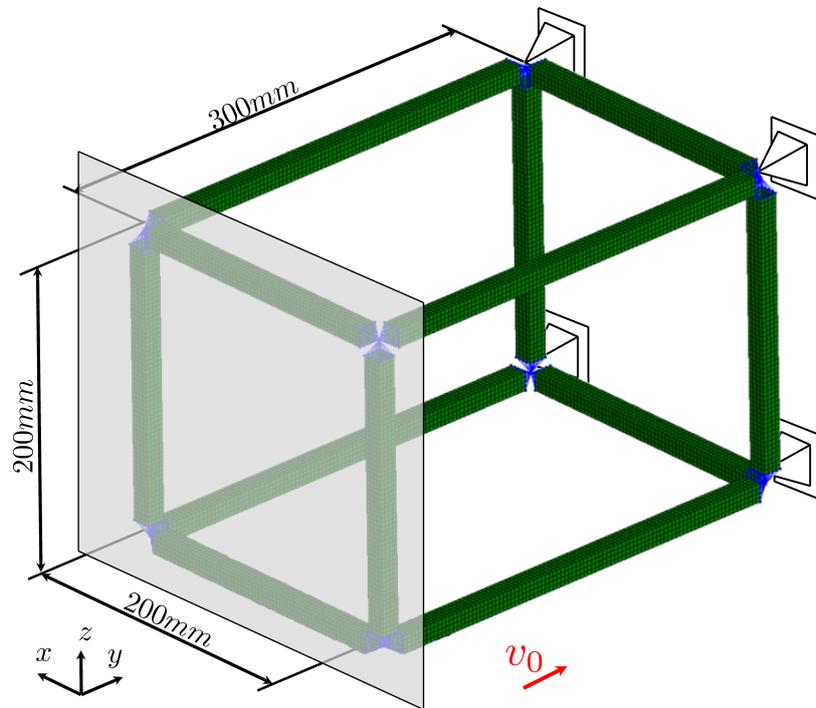
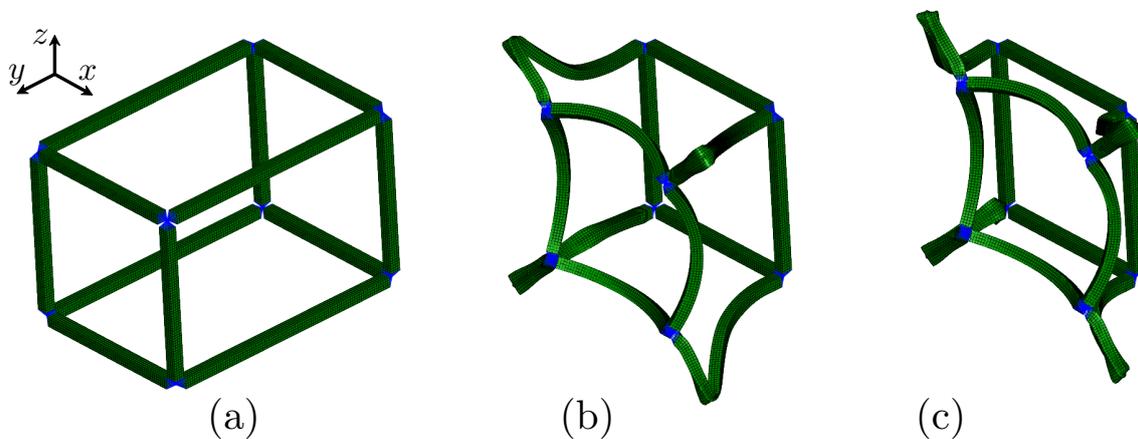


Abbildung 9.9: Startentwurf - Lastfall: Einschlag starre Wand

Abbildung 9.10: Ausgangsmodell Einschlag starre Wand: Ausgangszustand bei $t_0 = 0.000s$ (a) Deformation bei $t = 0.020s$ (b) Deformation bei $t = 0.050s$ (c)

9.2.1 Optimierungsziel: Minimiere die Intrusion der Wand

In der ersten Optimierung wird die Intrusion der starren Wand minimiert. Die Auswertung wird am Schwerpunkt ausgeführt. Die Simulationszeit beträgt $0.050s$ und die Verschiebung im Ausgangsmodell beträgt $209mm$. Eine Übersicht über die Restriktionen gibt Tabelle 9.8 wieder. Die geometrischen Restriktionen werden auf der Graphenebene überprüft. Im Vergleich zu den Optimierungsbeispielen zuvor wird die Symmetriebedingung um die

yz -Ebene erweitert. Die Optimierung verläuft über 10 Iterationen und die Informationen

Tabelle 9.8: Übersicht über die aktiven Restriktionen - Minimiere die Verschiebung der starren Wand

Restriktionen	Grenzen
Wandstärke	$0.8mm \leq x \leq 3.5mm$
Edge-Länge	$\geq 35.0mm$
Masse	$= 500.0g$
Verbindungswinkel	$\geq 15.0^\circ$
Abstand zwischen Edges	$\geq 35.0mm$
Symmetriebedingung	$xy - \& yz - Ebene$

sind in Tabelle 9.9 aufgelistet. Die Anzahl der Formvariablen des Startentwurfs reduziert sich aufgrund der Doppelsymmetriebedingung auf drei. Durch die Formoptimierung reduziert sich die Intrusion auf $116.53mm$. Die enorme Verbesserung der Verschiebung entsteht durch die trapezprismaförmige Außenstruktur. Der Rahmen verläuft in Richtung der vorderen Seite am Aufprallort zusammen. Ab Iteration 1 entstehen durch die Heuristiken verschiedene neue Entwürfe. In Abbildung 9.11 ist ein Auszug eines Modells aus Iteration 2 gezeigt, bei dem eine mittlere Verbindung entsteht. In Abbildung 9.11 a) wird der undeformierte Zustand gezeigt und in 9.11 b) ist zu erkennen, dass die zwei Profile, in Lastpfadrichtung auf der ersten Symmetrieebene mittig zusammenstoßen. Aufgrund der lateralen Deformation bewegt sich die starre Wand mit weniger Widerstand durch die gesamte Struktur. Die Heuristik *Nutzen von Deformationsräumen Druck* zieht an dieser Stelle ein neues Profil ein und erhöht den Widerstand der Struktur gegen das Eindringen.

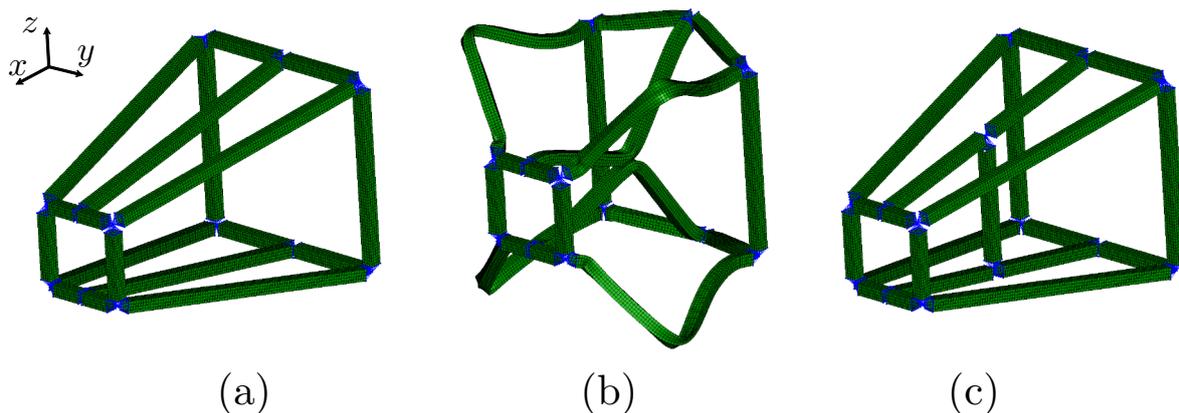


Abbildung 9.11: Auszug Iteration 1 auf 2: Ausgangszustand bei $t_0 = 0.000s$ (a) Deformation bei $t = 0.020s$ (b) Einzug eines neuen Profils (c)

Nach 10 Iterationen kann kein besserer Entwurf mehr gefunden werden und mit dem bis dahin besten Entwurf werden die Wandstärken optimiert. Die Deformation vom finalen Entwurf ist in Abbildung 9.12 im Verlauf dargestellt. Die meisten neuen Profile

Tabelle 9.9: Optimierungshistorie – starre Wand: Minimiere die Verschiebung

Iteration [-]	Zielfunk. [mm]	Änderung [-]	Funktionsaufrufe [-]
<i>Startentwurf</i>	209.84	-	1
0	116.53	3 Formvariablen	600
1	104.36	heurist. Manip.	6
2	82.79	heurist. Manip.	23
3	70.08	heurist. Manip.	19
4	70.50	heurist. Manip.	19
5	64.68	heurist. Manip.	18
6	49.25	heurist. Manip.	15
7	49.61	heurist. Manip.	15
8	45.87	heurist. Manip.	18
9	45.74	heurist. Manip.	12
10	44.18	15 Dim.variablen	615

entstehen an der oberen und unteren Seite und unterstützen die einzelnen Bereiche gegen Stabilitätsverlust und infolgedessen vor weiterem Durchbiegen.

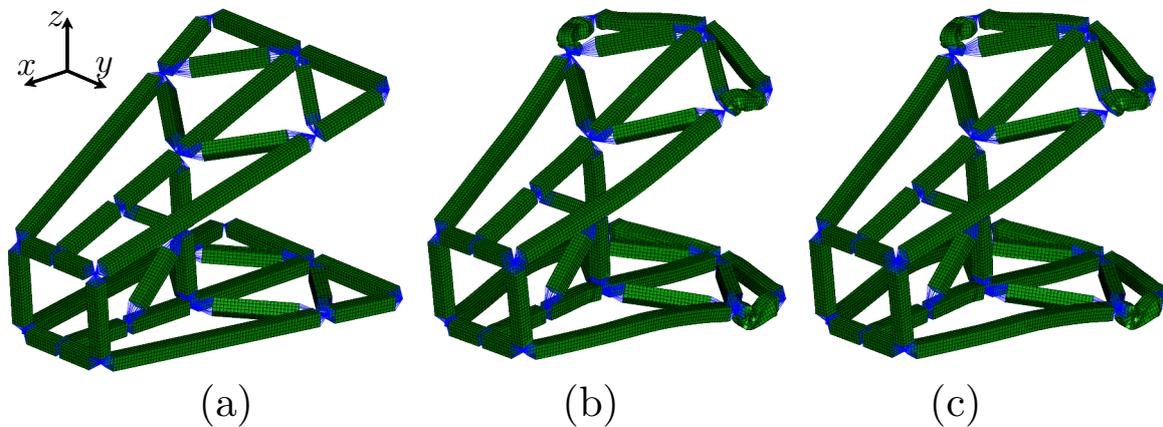


Abbildung 9.12: Bester Entwurf, Einschlag starre Wand - Intrusion: Ausgangszustand bei $t_0 = 0.000s$ (a) Deformation bei $t = 0.010s$ (b) Deformation bei $t = 0.020s$ (c)

Weiterhin ist im Bereich der Einspannung zu erkennen, dass die teils kurzen Profile stark deformieren. Diese Profile können nicht weiter gestützt werden, da sonst die Restriktionen der kleinen *Edge*-Länge verletzt werden.

Tabelle 9.10: Übersicht über die aktiven Restriktionen - Minimiere die Verschiebung der starren Wand

Restriktionen	Grenzen
Verschiebung Wand	$\leq 150mm$
Wandstärke	$0.8mm \leq x \leq 3.5mm$
Edge-Länge	$\geq 35.0mm$
Masse	$= 500.0g$
Verbindungswinkel	$\geq 15.0^\circ$
Abstand zwischen Edges	$\geq 35.0mm$
Symmetriebedingung	$xy - \& yz - Ebene$

9.2.2 Optimierungsziel: Minimiere die maximale Kontaktkraft der Wand

In der zweiten Optimierung wird die maximale Kontaktkraft zwischen der starren Wand und dem Rahmen minimiert. Die eingestellten Restriktionen bleiben wie im vorangegangenen Beispiel unverändert. Für diesen Fall wird wieder eine zusätzliche Restriktion eingefügt. Der Rahmen soll die starre Wand bis zu einem Weg von $150mm$ stoppen, das entspricht der halben Länge des Rahmens. Die Restriktionen sind in Tabelle 9.10 aufgelistet. Die Optimierungsprozedur verläuft über 6 Iterationen und die dazugehörigen Informationen sind in Tabelle 9.11 aufgelistet. In der ersten Iteration ist es nicht möglich eine Verbesserung durch die Formoptimierung zu erhalten. Sobald sich der Rahmen an der vorderen Seite schmälert, steigt die Steifigkeit und daraufhin steigt auch die maximale Kontaktkraft. Die Position am äußeren Rand stellt schon einen guten Entwurf dar. Daraufhin verläuft die Optimierung weiter mit dem Startentwurf. Die Heuristiken werden ab Iteration 1 aktiv und verbessern den Entwurf bis einschließlich Iteration 5. Die topologische Modifikation stoppt, da die untere Grenze der Wandstärken erreicht wurde. Jedes weitere Profil würde dazu führen, dass die Massenrestriktion verletzt werden würde, da

Tabelle 9.11: Optimierungshistorie – starre Wand: Minimiere die maximale Kontaktkraft

Iteration [-]	Zielfunk. [N]	Verschiebung [mm]	Änderung [-]	Funk [-]
<i>Startentwurf</i>	89856	209.84	-	1
0	89856	209.84	3 Formvariablen	120
1	76460	156.56	heurist. Manip.	6
2	66871	152.68	heurist. Manip.	27
3	54945	134.16	heurist. Manip.	30
4	53015	131.22	heurist. Manip.	30
5	53015	127.31	heurist. Manip.	16
6	52634	129.25	8 Dim.variablen	29

die Wandstärke nicht unter 0.8mm sinken kann. In Iteration 6 findet die Evaluation der Wandstärken abschließend statt. In dieser abschließenden Optimierung ist nicht mehr genügend Potential für eine Verbesserung vorhanden, da sich alle Wandstärken bereits sehr nah an der unteren Grenze befinden. Die Deformation des hier erzielten besten Entwurfs ist in Abbildung 9.13 dargestellt.

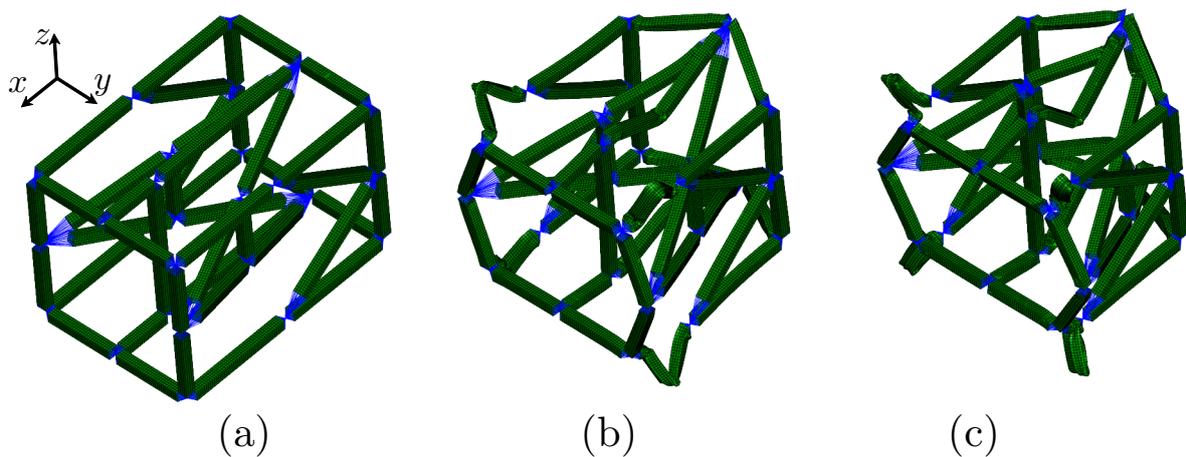


Abbildung 9.13: Bester Entwurf, Einschlag starre Wand - Kontaktkraft: Ausgangszustand bei $t_0 = 0.000\text{s}$ (a) Deformation bei $t = 0.010\text{s}$ (b) Deformation bei $t = 0.040\text{s}$ (c)

Der Kraft-Weg-Verlauf ist in Abbildung 9.14 geplottet. Im Deformationsverlauf fällt auf, dass die gesamte Struktur noch eine hohe Steifigkeit besitzt. Die Formoptimierung besitzt für diesen Lastfall bei den geometrischen Gegebenheiten wenig Freiraum.

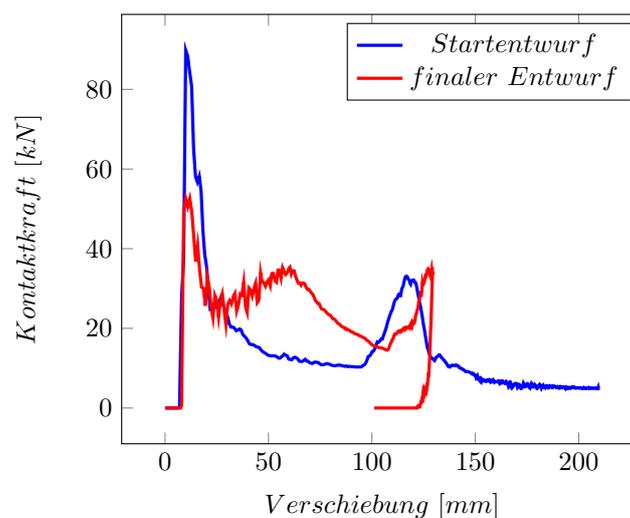


Abbildung 9.14: Kraft-Weg-Verlauf im Modell: Einschlag starre Wand - Minimiere die maximale Kontaktkraft

Im Folgenden wird dieser Lastfall nochmals betrachtet, wobei der Optimierungsablauf etwas geändert wird. Mit steigender Anzahl an Iterationen, entstehen auch mehr Verbindungsknoten innerhalb der Struktur. Die Formvariablen werden an den *Vertices* definiert und desto mehr Verbindungsknoten vorhanden sind, desto mehr Formvariablen stehen der Formoptimierung zur Verfügung. Im vorangegangenen Beispiel blieb der Startentwurf nach der ersten Formoptimierung erhalten. Die Prozedur wird mit dem gleichen Startentwurf gestartet. Die Formoptimierung findet nun erst vor der finalen Dimensionierungsoptimierung statt, um dem Entwurf ein größeres Verbesserungspotential einzuräumen. Die Optimierungshistorie ist in Tabelle 9.12 aufgelistet. Die Form- und Dimensionierungsoptimierung werden getrennt voneinander ausgeführt, damit die Anzahl der Entwurfsvariablen insgesamt für die Verwendung von mathematischen Optimierungsverfahren moderat ist. Mit dieser Einstellung ist es möglich, die maximale Kontaktkraft auf $30.6kN$ zu reduzie-

Tabelle 9.12: Optimierungshistorie – Einschlag starre Wand: Minimiere die maximale Kontaktkraft, Formoptimierung des besten Entwurfs

Iteration [-]	Zielfunk. [N]	Verschiebung [mm]	Änderung [-]	Funk. [-]
<i>Startentwurf</i>	89856.21	209.84	-	1
1	76460.10	156.56	heurist. Manip.	6
2	66871.04	152.68	heurist. Manip.	27
3	54945.14	134.16	heurist. Manip.	30
4	53885.71	131.22	heurist. Manip.	30
5	53015.13	127.31	heurist. Manip.	16
6	30869.14	146.40	15 Formvariablen	601
7	30607.32	149.72	19 Dim.variablen	608

ren. Die Deformation ist in Abbildung 9.15 dargestellt. Nahezu alle Profile sind während der Deformation involviert.

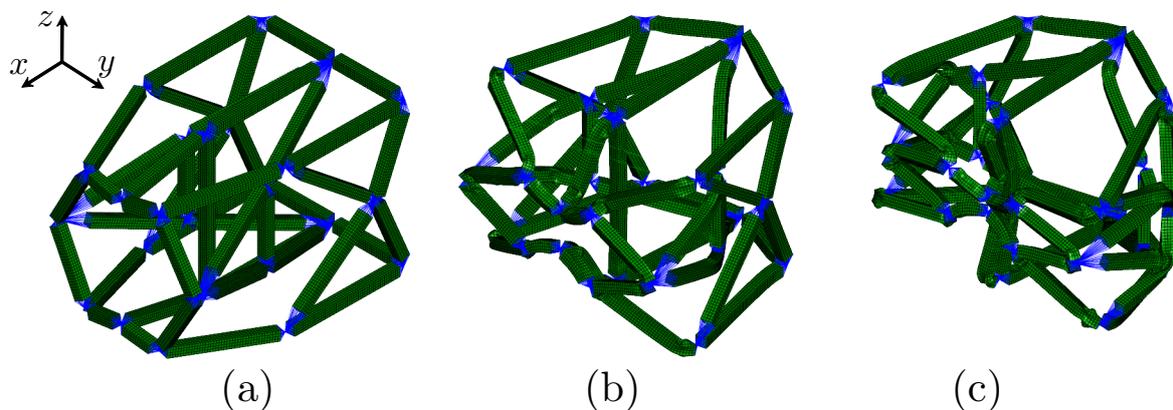


Abbildung 9.15: Bester Entwurf, Einschlag starre Wand - Kontaktkraft: Ausgangszustand bei $t_0 = 0.000s$ (a) Deformation bei $t = 0.010s$ (b) Deformation bei $t = 0.040s$ (c), Formoptimierung des besten Entwurfs

Die Struktur besitzt wesentlich weniger gerade durchlaufende Strukturen, was die Steifigkeit etwas reduziert, aber noch genügend Steifigkeit bietet, um die starre Wand aufzuhalten. Die starre Wand wird innerhalb der geforderten 150mm Verformungsweg aufgehalten. Der finale Entwurf hält alle geforderten Restriktionen ein. In Abbildung 9.16 ist der Kraft-Weg-Verlauf geplottet und zeigt im Vergleich zu dem Startentwurf eine gleichmäßigere Energieaufnahme. Gerade die ausgelenkten Strukturen ermöglichen einen gleichmäßigeren Kraftverlauf, da intern entstehende Momente die initiale Kraft zur Deformation der Struktur deutlich senken.

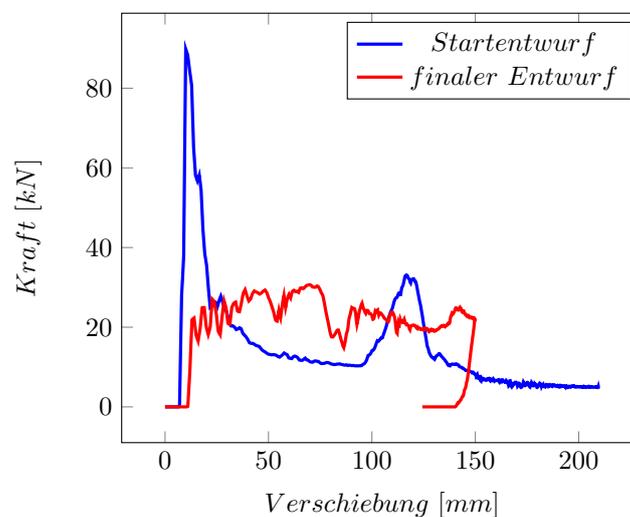


Abbildung 9.16: Kraft-Weg-Verlauf im Modell: Einschlag starre Wand - Minimiere die maximale Kontaktkraft, Formoptimierung des besten Entwurfs

10 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Projekt wurde auf der Grundlage der an der Universität Wuppertal entwickelten Methode der Graphen und Heuristikbasierten Topologieoptimierung (GHT) eine Erweiterung auf dreidimensionale Rahmenstrukturen vorgestellt. Mit der GHT3D können bei den Strukturen, bestehend aus zusammengesetzten Profilen und unter der Berücksichtigung von Crashlastfällen, deutliche Verbesserungen für ein formuliertes Optimierungsproblem erzielt werden. Zur flexiblen Beschreibung der dreidimensionalen Geometrie wurde eine neue Graphensyntax entwickelt. Die Syntax ermöglicht einen variablen Aufbau des dreidimensionalen Rahmens mit variablen Profilquerschnittsbeschreibungen.

Als Zielfunktion des Ablaufs können Beschleunigungen oder Kontaktkräfte zwischen verschiedenen Komponenten verwendet werden. Aber auch die Verschiebung von Impaktoren als Zielfunktion ist möglich. In dem iterativen Verfahren können Restriktionen, wie die maximale Verschiebung von Impaktoren berücksichtigt werden. Eine weitere Besonderheit ist die Einstellmöglichkeit einer Reihe von geometrischen Restriktionen auf der Graphenebene. Dabei können minimale Verbindungswinkel oder der räumliche Abstand zwischen Profilen vorgegeben werden. Auch kann eine zulässige Gewichtsrestriktion eingestellt werden, um die Strukturen auf ein Gewichtsniveau zu skalieren, wobei eine obere und untere Grenze für die Wandstärken vorgegeben werden kann.

Die Optimierungsprozedur besteht aus zwei ineinander laufenden Schleifen. Die topologische Modifikation wird in der äußeren Schleife durch eine Reihe von Heuristiken mit verschiedenen Strategien ausgeführt. Innerhalb der Rahmenstruktur werden Geschwindigkeiten, Verschiebungen von Teilstrukturen oder die innere Energiedichte zur Auswertung durch die Heuristiken verwendet. In der inneren Optimierungsschleife kommen mathematische Optimierungsalgorithmen zur Evaluation der Wandstärken oder der Rahmenform zum Einsatz.

Anstelle von Profilen, die mit Schalenelementen diskretisiert sind, können schnell rechnende *Crushable Frame Springs* von Altair verwendet werden. Nachdem eine Bibliothek für bestimmte geometrische Bereiche zur Beschreibung verschiedener Profile aufgebaut wurde, ist für die sonst eher rechenintensive Methode eine enorme Zeitersparnis möglich.

Das Verfahren wurde in einer geschlossenen Java-Anwendung umgesetzt. Zur Berechnung der Schalenmodelle sind Schnittstellen zu den externen expliziten Solvern *LS-DYNA* und *RADIOSS* implementiert. Die *Crushable Frame Springs*-Modelle werden mit dem Solver

RADIOSS berechnet. In der inneren Optimierungsschleife werden mathematische Optimierungsalgorithmen von LS-OPT 5.2 verwendet. Der Ablauf ist in Windows und Linux ausführbar. Für parallelisiertes Rechnen der verschiedenen Entwürfe wurde der Ablauf für das Rechencluster am Lehrstuhl für Optimierung mechanischer Strukturen erweitert.

Zu den implementierten Heuristiken stehen noch eingehende Untersuchungen aus. Dazu zählt die Fragestellung: Welche Heuristik generiert auch tatsächlich im Einzelnen gute Entwürfe für die verschiedenen Zielfunktionen. Für den vollständigen Vergleich stehen noch weitere Optimierungen mit den *Crushable Frame Springs* aus. Zurzeit sind die Verbindungsknoten mit starren Elementen umgesetzt, die zu falschem Deformationsverhalten führen. In Zukunft sollten adäquate Verbindungselemente entwickelt und in die automatisierte Modellerstellung implementiert werden.

Auch eine Erweiterung der Definition von komplexen Bauraumrestriktionen ist erstrebenswert, um in eingeschränkten Bauräumen agieren zu können.

Die zurzeit implementierten Heuristiken sind aus dem Wissen der GHT zur Optimierung von Profilquerschnitten abgeleitet. Die Entwicklung von neuen Heuristiken, die beispielsweise die Richtung von Deformation im dreidimensionalen Raum betrachten, steht noch aus. Des Weiteren sind neue Heuristiken zur mechanisch begründeten Querschnittsvergabe, also der Vergabe von fertigen Profilquerschnitten, je nach Belastungssituation denkbar.

Für die Anwendung der Konzeptfindung in Teilbereichen von Kraftfahrzeugen sollten zur Integration der Rahmenmodelle noch zusätzliche Anbindungspunkte zu anderen Komponenten entwickelt und integriert werden. Auch die Beschreibung von Profilen entlang vorgegebener Bahnkurven kann zur Integration oder zum Abbilden von angrenzenden Komponenten hilfreich sein.

Die hier vorgestellte Methode bietet insgesamt mit der flexiblen Geometriebeschreibung und den Schnittstellen zu expliziten Rechen-Solvern großes Potential zur Optimierung von crashbelasteten Rahmenstrukturen. Auch die Zusammenarbeit mit Altair und der Berechnung mittels *Crushable Frame Springs* Modellen eröffnet neue Möglichkeiten in Bezug auf die heuristikbasierte Optimierungsstrategie. Wenn die Bibliothek zur Beschreibung der verwendeten Profile aufgebaut wurde, kann die Anzahl von Funktionsaufrufen auch innerhalb der rechenintensiven Formoptimierung zur besseren Abtastung des Entwurfsraumes um ein Vielfaches ansteigen.

Das im Rahmen dieses Projekts entwickelte Software-Programm steht allen Mitgliedern des FAT-Arbeitskreis „CAE in der Konzeptfindung“ für eigene Untersuchungen zur Verfügung. Damit ist gewährleistet, dass die entwickelten Verfahren vielseitig getestet und Verbesserungspotenziale aufgezeigt werden können.

Literaturverzeichnis

- [1] Inc. Altair Engineering. *RADIOSS 2019 User's Guide*. Altair Engineering, Inc. 2019.
- [2] M. P. Bendsøe. "Optimal shape design as a material distribution problem". *Structural optimization* 1.4 (1989), S. 193–202. ISSN: 1615-1488. DOI: 10.1007/BF01650949. URL: [↗](#).
- [3] Dominique Chapelle und Klaus-Jürgen Bathe. *The Finite Element Analysis of Shells-Fundamentals*. 2. Aufl. Springer Heidelberg Dordrecht London New York: Springer, 2011. ISBN: 978-3-642-16407-1.
- [4] WS. Choi und GJ. Park. "Structural Optimization using Equivalent Static Loads at all the Time Intervals". *Comput. Methods. Appl. Math.*, 191.19 (2002), S. 2077–2094.
- [5] Reinhard Diestel. *Graph Theory*. Springer, Berlin, Heidelberg: Springer, 2017. ISBN: 978-3-662-53622-3.
- [6] S. Hunkeler. "Topology Optimization in Crashworthiness Design via Hybrid Cellular Automata for Thin-Walled Structures". Diss. Queen Mary University of London, UK., 2013.
- [7] N. Ivarsson, M. Wallin und D. Tortorelli. "Topology optimization of finite strain viscoplastic system under transient loads". *Int J Numer Methods Eng.*, 114 (2018), S. 1351–1367.
- [8] C. Mortished u. a. "Multidisciplinary Optimisation of an Automotive Body-in-White Structure Using Crushable Frame Springs and Sub Space Metamodels in Trust-Regions". Schumacher, A., Vietor, T., Fiebig, S., Bletzinger, K.-U., Maute, K.: *Advances in Structural and Multidisciplinary Optimization* (Braunschweig, Germany). Springer, Cham, 2018, S. 1572–1584.
- [9] C. Ortmann und A. Schumacher. "Graph and heuristic based topology optimization of crash loaded structures". *Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization* 47 (2013), S. 839–854. URL: [↗](#).

-
- [10] C. Ortmann und A. Schumacher. “Mathematical Description and Algorithmization of Expert Knowledge for the Support of the Topology Optimization of Crashworthiness Structures”. *PAMM Proc. Appl. Math. Mech.*, 14 (2014), S. 1023–1026.
- [11] GJ. Park. “Technical overview of the Equivalent Static Loads Method for Non-Linear Static Response Structural Optimization”. *Struct. Multidisc. Optim.*, 43.3 (2011), S. 319–337.
- [12] NM. Patel. “Crashworthiness Design Using Topology Optimization”. Diss. University of Notre Dame, USA., 2007.
- [13] NM. Patel, JE. Renaud und Tovar A. “Crashworthiness Design Using Topology Optimization”. *ASME. J. of Mech Design.*, 132.6 (2009).
- [14] C.B.W. Pedersen. “Crashworthiness design of transient frame structures using topology optimization”. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 193 (2004), S. 653–678.
- [15] C.B.W. Pedersen. “Topology optimization design of crushed 2D-frames for desired energy absorption history”. *Struct. Multidisc. Optim.*, 25 (2003), S. 368–382.
- [16] Axel Schumacher. *Optimierung mechanischer Strukturen - Grundlagen und industrielle Anwendungen*. 2. Aufl. Berlin Heidelberg New York: Springer, 2013. ISBN: 978-3-642-34700-9.
- [17] K. Weider und A. Schumacher. “A Topology Optimization Scheme for Crash Loaded Structures Using Topological Derivatives”. *Schumacher, A., Vietor, T., Fiebig, S., Bletzinger, K.-U., Maute, K.: Advances in Structural and Multidisciplinary Optimization* (Braunschweig, Germany). Springer, Cham, 2018, S. 1601–1614.
- [18] K. Weider und A. Schumacher. “Adjoint Method for Topological Derivatives for Optimization Tasks With Material and Geometrical nonlinearities”. *Rodrigues, H. et.al.: EngOpt 2018 Proc. of the 6th International Conference on Engineering Optimization* (Lisb, Portugal). Springer Nature Switzerland, 2019, S. 867–878.
- [19] D. Zeng und F. Duddeck. “Improved hybrid cellular automata for crashworthiness optimization of thin-walled structures”. *Struct. Multidisc. Optim.*, 56 (2017), S. 101–115.

11 Abbildungsverzeichnis

2.1	Optimierungsschleife, bestehend aus einem Analysemodell und dem Optimierungsalgorithmus [16]	4
4.1	Zweidimensionale Graphendarstellung	11
4.2	Dreidimensionale Graphendarstellung	12
4.3	Graphendarstellung links; extrudiertes Finite Elemente Modell rechts . . .	15
4.4	Hierachische Graphenstruktur	16
4.5	Steuerung der Ausrichtung durch den Orientierungsvektor	20
4.6	Darstellung einer <i>Edge</i> mit entgegengesetzter Extrusionsrichtung	21
4.7	Steuerung der Profillänge mit dem Keyword <i>Length</i>	21
4.8	Finite Elemente Rahmenstruktur	24
4.9	Automatisierte Anpassung der Profillänge über das Keyword <i>Length</i> an Verbindungsknoten	24
4.10	Aufschlüsselung des Labels zur Identifikation und Zuweisung von Informationen von Graphenelementen	25
5.1	Schematische Darstellung <i>Abstützen schnell deformierender Edges</i> : Ausgangsgeometrie (a) Schnelle Deformation unter Last (b) Neue Struktur mit unterstützender <i>Edge</i> (c)	27
5.2	Auswertung für schnelle Deformation in lateraler Richtung	27
5.3	Schematische Darstellung <i>Nutzen von Deformationsräumen Druck</i> : Ausgangsgeometrie (a) Biegefall (b) Neue Struktur mit einer auf Druck belasteten <i>Edge</i> (c)	29
5.4	Schematische Darstellung <i>Nutzen von Deformationsräumen Zug</i> : Ausgangsgeometrie (a) Biegefall (b) Neue Struktur mit einer auf Zug belasteten <i>Edge</i> (c)	29
5.5	Schematische Darstellung <i>Teilen langer Edges</i> : Ausgangsgeometrie (a) Erstellt eine neue <i>Edge</i> zwischen zwei langen Profilen (b)	30
5.6	Schematische Darstellung <i>Ausgleichen der Energiedichte</i> : Ausgangsgeometrie (a) Auftreten hoher innerer Energie an der oberen Frontseite (b) Struktur mit neuer <i>Edge</i> (c)	31
5.7	Schematische Darstellung <i>Skalieren der Wandstärken</i> : Ausgangsgeometrie (a) Skaliert die Wandstärken der Profile (b)	31
5.8	Schematische Darstellung <i>Glätten des Graphen</i> : Ausgangsgeometrie (a) Begradigt zwei <i>Edges</i> (b)	32

6.1	Ablaufdiagramm der verschachtelten Optimierungsschleifen. Die äußere Optimierungsschleife ändert die Topologie und die innere Optimierungsschleife führt Form- und Dimensionierungsoptimierungen aus	34
7.1	Ausgangsgeometrie (a) Darstellung der expliziten Grenzen der Formvariablen (b)	39
7.2	Erste Auslenkung des Vertex im Entwurfsraum (a) Zweite Auslenkung von 3 Formvariablen an einem anderen Vertex zur kombinierten Prüfung (b) . .	40
8.1	Darstellung der Reduzierung von Schalenmodell auf 1D-Element	42
8.2	Auflistung der Lastfälle zur Charakterisierung eines Profils, aus [1]	42
8.3	Vergleich eines <i>Crushable Frame Springs</i> Modell mit einem Schalenmodell eines Biegequerträgers, aus [8]	43
8.4	Innere Optimierungsschleife der GHT (a) Innere Optimierungsschleife mit <i>Crushable Frame Springs</i> (b)	44
8.5	Auswahl von Verbindungsknoten im <i>Crushable Frame Spring</i> Modell . .	46
9.1	Startentwurf - Lastfall: Einschlag starrer Zylinder	48
9.2	Ausgangsmodell Einschlag starrer Zylinder: Ausgangszustand bei $t_0 = 0.000s$ (a) Deformation bei $t = 0.015s$ (b) Deformation bei $t = 0.030s$ (c)	49
9.3	Ausschnitt aus der Graphenmodifikation zwischen Iteration 1 und Iteration 6 - Minimiere die Intrusion des Zylinders	51
9.4	Bester Entwurf, Einschlag starrer Zylinder, minimiere die Verschiebung: Ausgangszustand bei $t_0 = 0.000s$ (a) Deformation bei $t = 0.003s$ (b) Deformation bei $t = 0.010s$ (c)	52
9.5	Vergleich des Rahmenmodells - Einschlag starrer Zylinder für ein Simulationszeit $t = 0.020s$: <i>Crushable Frame Springs</i> Modell, Verschiebung: $159.50mm$ (a) RADIOSS-Schalenmodell, Verschiebung: $140,34mm$ (b) LS-DYNA-Schalenmodell, Verschiebung $147,30mm$ (c)	53
9.6	Vergleich des Rahmenmodells - Einschlag starrer Zylinder bei der Simulationszeit $t = 0.010s$: <i>Crushable Frame Springs</i> Modell, Verschiebung: $24.61mm$ (a) RADIOSS-Schalenmodell, Verschiebung: $23,94mm$ (b)	54
9.7	Bester Entwurf, Einschlag starrer Zylinder, minimiere die maximale Kontaktkraft: Ausgangszustand bei $t_0 = 0.000s$ (a) Deformation bei $t = 0.010s$ (b) Deformation bei $t = 0.030s$ (c)	56
9.8	Kraft-Weg-Verlauf im Modell: Einschlag starrer Zylinder - Minimiere die maximale Kontaktkraft	57
9.9	Startentwurf - Lastfall: Einschlag starre Wand	58
9.10	Ausgangsmodell Einschlag starre Wand: Ausgangszustand bei $t_0 = 0.000s$ (a) Deformation bei $t = 0.020s$ (b) Deformation bei $t = 0.050s$ (c)	58
9.11	Auszug Iteration 1 auf 2: Ausgangszustand bei $t_0 = 0.000s$ (a) Deformation bei $t = 0.020s$ (b) Einzug eines neuen Profils (c)	59

9.12	Bester Entwurf, Einschlag starre Wand - Intrusion: Ausgangszustand bei $t_0 = 0.000s$ (a) Deformation bei $t = 0.010s$ (b) Deformation bei $t = 0.020s$ (c)	60
9.13	Bester Entwurf, Einschlag starre Wand - Kontaktkraft: Ausgangszustand bei $t_0 = 0.000s$ (a) Deformation bei $t = 0.010s$ (b) Deformation bei $t = 0.040s$ (c)	62
9.14	Kraft-Weg-Verlauf im Modell: Einschlag starre Wand - Minimiere die maximale Kontaktkraft	62
9.15	Bester Entwurf, Einschlag starre Wand - Kontaktkraft: Ausgangszustand bei $t_0 = 0.000s$ (a) Deformation bei $t = 0.010s$ (b) Deformation bei $t = 0.040s$ (c), Formoptimierung des besten Entwurfs	63
9.16	Kraft-Weg-Verlauf im Modell: Einschlag starre Wand - Minimiere die maximale Kontaktkraft, Formoptimierung des besten Entwurfs	64

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2014)

Nr.	Titel
263	Laserstrahlschweißen von Stahl an Aluminium mittels spektroskopischer Kontrolle der Einschweißtiefe und erhöhter Anbindungsbreite durch zweidimensional ausgeprägte Schweißnähte, 2014
264	Entwicklung von Methoden zur zuverlässigen Metamodellierung von CAE Simulations-Modellen, 2014
265	Auswirkungen alternativer Antriebskonzepte auf die Fahrdynamik von PKW, 2014
266	Entwicklung einer numerischen Methode zur Berücksichtigung stochastischer Effekte für die Crashsimulation von Punktschweißverbindungen, 2014
267	Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 1, 2014
268	Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 2, 2014
269	Schwingfestigkeitsbewertung von Schweißnahtenden MSG-geschweißter Feinblechstrukturen aus Aluminium, 2014
270	Physiologische Effekte bei PWM-gesteuerter LED-Beleuchtung im Automobil, 2015
271	Auskunft über verfügbare Parkplätze in Städten, 2015
272	Zusammenhang zwischen lokalem und globalem Behaglichkeitsempfinden: Untersuchung des Kombinationseffektes von Sitzheizung und Strahlungswärmeübertragung zur energieeffizienten Fahrzeugklimatisierung, 2015
273	UmCra - Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der mechanischen und thermischen Vorgeschichte bei hochfesten Stählen, 2015
274	Exemplary development & validation of a practical specification language for semantic interfaces of automotive software components, 2015
275	Hochrechnung von GIDAS auf das Unfallgeschehen in Deutschland, 2015
276	Literaturanalyse und Methodenauswahl zur Gestaltung von Systemen zum hochautomatisierten Fahren, 2015
277	Modellierung der Einflüsse von Porenmorphologie auf das Versagensverhalten von Al-Druckgussteilen mit stochastischem Aspekt für durchgängige Simulation von Gießen bis Crash, 2015
278	Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen, 2015
279	Sensitivitätsanalyse rollwiderstandsrelevanter Einflussgrößen bei Nutzfahrzeugen – Teil 3, 2015
280	PCM from iGLAD database, 2015
281	Schwere Nutzfahrzeugkonfigurationen unter Einfluss realitätsnaher Anströmbedingungen, 2015
282	Studie zur Wirkung niederfrequenter magnetischer Felder in der Umwelt auf medizinische Implantate, 2015
283	Verformungs- und Versagensverhalten von Stählen für den Automobilbau unter crashartiger mehrachsiger Belastung, 2016
284	Entwicklung einer Methode zur Crashsimulation von langfaserverstärkten Thermoplast (LFT) Bauteilen auf Basis der Faserorientierung aus der Formfüllsimulation, 2016
285	Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf realer Fahrbahn, 2016

- 286 χ MCF - A Standard for Describing Connections and Joints in the Automotive Industry, 2016
- 287 Future Programming Paradigms in the Automotive Industry, 2016
- 288 Laserstrahlschweißen von anwendungsnahen Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2016
- 289 Untersuchung der Bewältigungsleistung des Fahrers von kurzfristig auftretenden Wiederübernahmesituationen nach teilautomatischem, freihändigem Fahren, 2016
- 290 Auslegung von geklebten Stahlblechstrukturen im Automobilbau für schwingende Last bei wechselnden Temperaturen unter Berücksichtigung des Versagensverhaltens, 2016
- 291 Analyse, Messung und Optimierung des Ventilationswiderstands von Pkw-Rädern, 2016
- 292 Innenhochdruckumformen laserstrahlgelöteter Tailored Hybrid Tubes aus Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2017
- 293 Filterung an Stelle von Schirmung für Hochvolt-Komponenten in Elektrofahrzeugen, 2017
- 294 Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feinbleche aus Stahl unter kombinierter Beanspruchung, 2017
- 295 Wechselwirkungen zwischen zyklisch-mechanischen Beanspruchungen und Korrosion: Bewertung der Schädigungsäquivalenz von Kollektiv- und Signalformen unter mechanisch-korrosiven Beanspruchungsbedingungen, 2017
- 296 Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur, 2017
- 297 Analyse zum Stand und Aufzeigen von Handlungsfeldern beim vernetzten und automatisierten Fahren von Nutzfahrzeugen, 2017
- 298 Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwertes von realen Nutzfahrzeugen im Fahrversuch und Vergleich verschiedener Verfahren zur numerischen Simulation, 2017
- 299 Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen, 2017
- 300 Thermisches Rollwiderstandsmodell für Nutzfahrzeugreifen zur Prognose fahrprofilspezifischer Energieverbräuche, 2017
- 301 The Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter in Ambient Air, 2017
- 302 Design Paradigms for Multi-Layer Time Coherency in ADAS and Automated Driving (MULTIC), 2017
- 303 Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit von Scheiben auf die Kondensatbildung, 2017
- 304 Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter realen Umgebungsbedingungen, 2018
- 305 Simulationsgestützte Methodik zum Entwurf intelligenter Energiesteuerung in zukünftigen Kfz-Bordnetzen, 2018
- 306 Einfluss der Kantenbearbeitung auf die Festigkeitseigenschaften von Stahl-Feinblechen unter quasistatisch und schwingender Beanspruchung, 2018
- 307 Fahrerspezifische Aspekte beim hochautomatisierten Fahren, 2018
- 308 Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter zeitvarianten Betriebsbedingungen, 2018
- 309 Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Schraubverbindungen mit gefurchem Gewinde, 2018
- 310 Konzept zur Auslegungsmethodik zur Verhinderung des selbsttätigen Losdrehens bei Bauteilsystemen im Leichtbau, 2018
- 311 Experimentelle und numerische Identifikation der Schraubenkopfverschiebung als Eingangsgröße für eine Bewertung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubenverbindungen, 2018

- 312 Analyse der Randbedingungen und Voraussetzungen für einen automatisierten Betrieb von Nutzfahrzeugen im innerbetrieblichen Verkehr, 2018
- 313 Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von Aluminiumwerkstoffen für die Crashesimulation, 2018
- 314 Definition einer „Äquivalenten Kontakttemperatur“ als Bezugsgröße zur Bewertung der ergonomischen Qualität von kontaktbasierten Klimatisierungssystemen in Fahrzeugen, 2018
- 315 Anforderungen und Chancen für Wirtschaftsverkehre in der Stadt mit automatisiert fahrenden E-Fahrzeugen (Fokus Deutschland), 2018
- 316 MULTIC-Tooling, 2019
- 317 EPHoS: Evaluation of Programming - Models for Heterogeneous Systems, 2019
- 318 Air Quality Modelling on the Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter Concentrations Using a High-Resolution Brake Use Inventory, 2019
- 319 Dehnratenabhängiges Verformungs- und Versagensverhalten von dünnen Blechen unter Scherbelastung, 2019
- 320 Bionischer LAM-Stahlleichtbau für den Automobilbau – BioLAS, 2019
- 321 Wirkung von Systemen der aktiven, passiven und integralen Sicherheit bei Straßenverkehrsunfällen mit schweren Güterkraftfahrzeugen, 2019
- 322 Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen - Umsetzung und Anwendung, 2019
- 323 Transitionen bei Level-3-Automation: Einfluss der Verkehrsumgebung auf die Bewältigungsleistung des Fahrers während Realfahrten, 2019
- 324 Methodische Aspekte und aktuelle inhaltliche Schwerpunkte bei der Konzeption experimenteller Studien zum hochautomatisierten Fahren, 2020
- 325 Der Einfluss von Wärmeverlusten auf den Rollwiderstand von Reifen, 2020
- 326 Lebensdauerberechnung hybrider Verbindungen, 2020
- 327 Entwicklung der Verletzungsschwere bei Verkehrsunfällen in Deutschland im Kontext verschiedener AIS-Revisionen, 2020
- 328 Entwicklung einer Methodik zur Korrektur von EES-Werten, 2020
- 329 Untersuchung zu den Einsatzmöglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Entwicklung von 3D-Rahmenstrukturen in Crashlastfällen, 2020

Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 www.vda-fat.de
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2020

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de
Twitter @VDA_online

VDA | Verband der
Automobilindustrie

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de/fat

FAT | Forschungsvereinigung
Automobiltechnik